



Centraal Planbureau
Planbureau voor de Leefomgeving

Cahier Klimaat en energie

TOEKOMSTVERKENNING • WELVAART EN LEEFOMGEVING



Cahier Klimaat en energie

Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving

Cahier Klimaat en energie

CPB/PBL

**Toekomstverkenning
Welvaart en Leefomgeving
Cahier Klimaat en energie**

© Planbureau voor de Leefomgeving
en Centraal Planbureau
Den Haag, 2015
PBL-publicatienummer: 1684

Auteurs

Jan Matthijsen (PBL), Rob Aalbers (CPB),
Ruud van den Wijngaart (PBL)

Met dank aan

Robert Koelemeijer (PBL), Martijn
Verdonk (voorheen PBL), Johannes Bollen
(CPB), David Gernaat (PBL), Bas van
Bemmel (PBL), Jan Ros (PBL), Detlef van
Vuuren (PBL)

Contact

jan.matthijsen@pbl.nl
r.f.t.aalbers@cpb.nl

Figuren

Beeldredactie PBL

Omslagfoto

Peter Hiltz / Hollandse Hoogte

Eindredactie en productie

Simone Langeweg Tekst- en
Communicatieadvies en Uitgeverij PBL

Vormgeving en opmaak

Textcetera, Den Haag

Druk

Xerox/OBT

U kunt de publicatie downloaden via de website www.wlo2015.nl. Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: CPB/PBL (2015), *Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Cahier Klimaat en Energie*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving/ Centraal Planbureau.

De Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Cahier Klimaat en energie is onderdeel van de serie 'Welvaart en Leefomgeving' (WLO) van het Planbureau voor de Leefomgeving en het Centraal Planbureau.

Projectleiding WLO

Ton Manders (PBL), Clemens Kool (CPB), Free Huizinga (CPB)

Stuurgroep WLO

Directie PBL en CPB

Inhoud

Voorwoord 7

Samenvatting 9

1 Inleiding 12

- 1.1 Historisch energiegebruik en broeikasgasemissies 14
- 1.2 Leeswijzer 15

2 WLO-scenario's Laag en Hoog 18

- 2.1 Toelichting onzekerheden 18
- 2.2 Verhaallijnen WLO-scenario's Laag en Hoog 22
- 2.3 Brandstofprijzen 26
- 2.4 CO₂-prijzen 29

3 Ontwikkelingen van het energiesysteem 32

- 3.1 Op hoofdlijnen 32
- 3.2 Finaal energiegebruik 36
- 3.3 Primair energiegebruik 38
- 3.4 Emissie van broeikasgassen 40
- 3.5 Hernieuwbare energie 40
- 3.6 Afvang en ondergrondse opslag van CO₂ (CCS) 41
- 3.7 De WLO-scenario's en de NEV 41

4 Energietransitie bij tweegradenscenario's 44

- 4.1 CO₂-prijzen 45
- 4.2 Tweegradenscenario's: Centraal en Decentraal 46

Literatuur 54

Voorwoord

Beleid wordt gemaakt voor de toekomst. Maar die toekomst gaat gepaard met grote onzekerheden. Voor beleidsmakers is het een uitdaging om voor een zo onzekere toekomst robuust beleid te ontwikkelen. Sinds 2006 schetsen de scenario's in de studie 'Welvaart en Leefomgeving' mogelijke toekomstbeelden die beleidsmakers enig houvast geven. Anno 2015 en een economische crisis verder, hebben departementen behoefte aan een nieuwe toekomstverkenning.

In de nieuwe 'WLO' presenteren het Centraal Planbureau en het Planbureau voor de Leefomgeving twee mogelijke toekomstbeelden voor Nederland. Voor een Nederland waarin huidige en toekomstige generaties moeten leven, wonen en werken. Deze toekomstbeelden kunnen beleidsopgaven zichtbaar maken waar de samenleving de komende decennia voor gesteld wordt, op het gebied van woningbouw, infrastructuur, energie en landbouw. De geschetste toekomstbeelden zijn ook bedoeld als een gezamenlijke basis voor het beoordelen van beleidsvoorstellen.

De WLO 2015 heeft een modulaire opzet. In een zestal thematische cahiers komen achtereenvolgens de volgende onderwerpen aan de orde:

1. Bevolking
2. Macro-economie
3. Regionale ontwikkelingen en verstedelijking
4. Mobiliteit
5. Klimaat en energie
6. Landbouw

Op basis van twee integrale referentiescenario's wordt voor elk thema een mogelijke toekomst geschetst. Daarnaast zijn per thema aanvullende onzekerheidsverkenningen uitgevoerd.

Een zevende cahier, *Nederland in 2030 en 2050: twee referentiescenario's*, vat de geschetste toekomst van de zes thema's samen. Daarnaast heeft de WLO een zogenoemde Bijsluiter, die onder andere aangeeft hoe de referentiescenario's kunnen worden gebruikt in maatschappelijke kosten-batenanalyses van beleidsplannen.

Voor de WLO hebben het CPB en PBL dankbaar gebruikgemaakt van de input van externe deskundigen en vertegenwoordigers van departementen.

Laura van Geest
Directeur CPB

Hans Mommaas
Directeur PBL

Samenvatting

Energie- en klimaatscenario's in mondiale context

De Nederlandse energiehuishouding is van oudsher sterk afhankelijk van geopolitieke, economische en technologische ontwikkelingen. Voor de toekomst is echter het mondiale klimaatbeleid de dominante onzekerheid. Voor de Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving (WLO) zijn om die reden energie- en klimaatscenario's ontwikkeld die tot 2050 uitgaan van de bestaande toezeggingen op het gebied van het mondiale klimaatbeleid. In scenario Laag, bij een lage economische groei, zal de wereldgemiddelde temperatuur na de eenentwintigste eeuw zijn gestegen met 3,5 tot 4 graden en in scenario Hoog, bij een hoge economische groei, met 2,5 tot 3 graden. In deze scenario's dalen de broeikasgasemissies in Nederland: in scenario Laag met 45 procent en in scenario Hoog met 65 procent ten opzichte van de emissie in 1990. Ook het finale energiegebruik daalt, wat vanuit historisch perspectief een trendbreuk is.

Klimaatbeleid

In beide scenario's intensiveert het klimaatbeleid. Het tempo waarin en de ambitie waarmee dit gebeurt, verschillen echter duidelijk per scenario. In scenario Laag wordt rond 2030 duidelijk dat er geen bereidheid is om de bestaande klimaatafspraken verder aan te scherpen. In scenario Hoog komen rond 2025 juist stringenter klimaatafspraken tot stand. Als gevolg hiervan loopt de CO₂-prijs in scenario Laag op van 4 euro per ton CO₂ in 2013 naar 15 euro in 2030 en naar 40 euro per ton CO₂ in 2050. In scenario Hoog zijn de CO₂-prijzen beduidend hoger: 40 euro per ton CO₂ in 2030 en 160 euro per ton CO₂ in 2050. In scenario Hoog wordt beprijzing, ondersteund door normstelling en innovatiebeleid, in mondiaal en Europees kader het belangrijkste beleidsinstrument. In scenario Laag blijft er in sterke mate sprake van aanvullend nationaal klimaatbeleid, zoals subsidies en nationale normen. In scenario Hoog verloopt de internationale samenwerking goed en blijven de geopolitieke spanningen beperkt. Als gevolg hiervan zijn de fossiele brandstofprijzen in dit scenario laag. In het Lage scenario zijn de fossiele brandstofprijzen juist relatief hoog.

Trendbreuk in energiegebruik

In beide WLO-scenario's raken het energiegebruik en de economische groei in absolute zin ontkoppeld: het energiegebruik daalt ondanks een groei van de economie. Dit betekent een trendbreuk met het energiegebruik in de periode tussen 1990 en 2013. In 2050 is het finale energiegebruik in beide scenario's gedaald: in scenario Hoog met 16 procent en in scenario Laag met 25 procent ten opzichte van 2013. Deze daling wordt vooral veroorzaakt door verbeteringen in de energie-efficiëntie als gevolg van

het gevoerde klimaatbeleid. De rol van gas en transportbrandstoffen in het finale energiegebruik neemt af en die van elektriciteit en hernieuwbare warmte neemt toe.

Sterke groei hernieuwbare energie ...

In zowel het Lage als het Hoge scenario neemt het aandeel hernieuwbare energie in het finale energiegebruik toe, van ongeveer 5 procent in 2013 tot 20-30 procent in 2030 en 40-50 procent in 2050. De belangrijke hernieuwbare energiebronnen zijn biomassa, wind, zon, aardwarmte en warmte uit de lucht via de inzet van warmtepompen. Het aandeel van hernieuwbare energie als grondstof voor niet-energetische toepassingen, zoals de productie van plastics en kunstmest, is gering verondersteld in 2050.

... maar fossiele energie blijft dominant

Fossiele energiedragers (kolen, olie en gas) blijven echter in beide scenario's dominant in het primaire energiegebruik. Het primaire energiegebruik houdt naast het finale energiegebruik van eindverbruikers ook rekening met omzettingsverliezen in centrales en het niet-energetische gebruik. Het aandeel van de fossiele energiedragers neemt af, van ongeveer 95 procent in 2013 tot 75-80 procent in 2030 en 60-70 procent in 2050.

Nieuwe technologieën worden goedkoper ...

Rond 2030 worden nieuwe koolstofarme technologieën, die nu nog in ontwikkeling zijn, in scenario Hoog grootschalig toegepast. Om welke technologieën het precies zal gaan, kan door de onzekerheid over de kostenontwikkeling van deze technologieën nu nog niet worden vastgesteld. Wel moet er voor die tijd al internationaal voldoende ervaring zijn opgedaan met kandidaat-technologieën, met het oog op efficiencyverbetering en kostendaling. Voorbeelden zijn de afvang en opslag van CO₂, nul-emissieauto's (elektrische auto's en auto's op waterstof), Nul op de Meter-woningen bij nieuwbouw en bij renovaties van bestaande bouw.

... maar daarvoor is extra ondersteuning nodig

Hoewel tot 2030 de noodzaak om koolstofarme technologieën grootschalig in te zetten nog beperkt is, moeten wetgeving en instituties al wel klaar zijn en moet voldoende leerervaring zijn opgedaan om na 2030 tot grootschalige invoering te kunnen overgaan. De relatief lage CO₂-prijs is onvoldoende om de benodigde innovaties bij de kandidaat-technologieën tot 2030 op gang te brengen. Daarvoor is in de WLO-scenario's additioneel nationaal of internationaal overheidsbeleid verondersteld.

Afvang en opslag van CO₂ is een belangrijke techniek

Afvang en ondergrondse opslag van CO₂ (Carbon Capture and Storage, CCS) is een techniek waarmee forse emissiereducties kunnen worden bereikt. CCS laat zich in een mix met andere CO₂-arme technologieën door haar kosteneffectiviteit moeilijk vervangen door andere technieken. In scenario Hoog is een belangrijke rol toegedicht aan CCS. In dit scenario wordt in 2050 ongeveer 30 procent van de totale emissie van

broeikasgassen als CO₂ afgevangen en opgeslagen. CCS is vooral belangrijk bij de warmtevoorziening in de industrie, bij de productie van transportbrandstoffen en bij elektriciteitscentrales. CCS wordt in dit scenario ook ingezet in combinatie met energie uit biomassa. Hierdoor wordt per saldo CO₂ uit de lucht verwijderd en treedt een negatieve emissie op. In scenario Laag speelt CCS geen rol.

Aanvullende onzekerheidsverkenning: 'het tweegradendoel'

In de aanvullende onzekerheidsverkenning is ervan uitgegaan dat sterker klimaatbeleid wordt gevoerd, zodat de wereldgemiddelde temperatuurstijging op lange termijn beperkt blijft tot 2 graden Celsius. Het 'tweegradendoel' geldt als de stip op de horizon voor het internationale en nationale klimaat- en energiebeleid. De verwachting is dat de Europese Unie en Nederland daarbij in 2050 een emissiereductie realiseren van ten minste 80 tot meer dan 95 procent, maar het is onzeker welke reductie precies nodig zal zijn. De CO₂-prijzen die bij dit doel passen, zijn zeer onzeker en lopen naar schatting uiteen van 200 tot 1.000 euro per ton CO₂ in 2050. Ter vergelijking: 200 euro per ton CO₂ leidt tot ongeveer 50 eurocent extra kosten per liter benzine. Om het tweegradendoel te halen, moet het klimaatbeleid zo snel mogelijk worden aangescherpt. In de onzekerheidsverkenning van het tweegradendoel zijn de CO₂-prijzen in 2030 – 100 tot 500 euro per ton CO₂ – dan ook veel hoger dan die in de WLO-scenario's (15 euro per ton CO₂ in scenario Laag en 40 euro per ton CO₂ in scenario Hoog).

Twee ruimtelijke beelden

Het tweegradendoel is voor het Nederlandse energiesysteem uitgewerkt in een minimumvariant waarin de emissies in 2050 met 80 procent dalen ten opzichte van 1990. De onzekerheid over de ontwikkeling van nieuwe technologieën en de maatschappelijke acceptatie daarvan wordt geïllustreerd met twee ruimtelijk verschillende beelden. Hierin wordt uitgegaan van dezelfde economische groei als in het Hoge scenario, maar wordt aanzienlijk meer ingezet op energiebesparing en hernieuwbare energie. In het tweegradenscenario Decentraal is dit nog meer dan in het tweegradenscenario Centraal. Daartegenover staat dat CCS in scenario Centraal een grotere rol en in Decentraal een kleinere rol speelt ten opzichte van scenario Hoog.

In scenario Centraal ligt het accent in de energiemix op centrale energieopwekking met een grote inzet van CCS, energie uit biomassa en collectieve warmtenetten voor de glastuinbouw en de gebouwde omgeving, en met transport van aardwarmte en restwarmte uit de industrie. Scenario Decentraal verschilt van Centraal door nog meer energiebesparing; onder andere door verdergaande elektrificatie, minder fossiele brandstoffen en een andere technologiemix van hernieuwbare energiebronnen. In 2050 kan een broeikasgasemissiereductie van 80 procent worden gerealiseerd, met een aandeel hernieuwbare energie van ongeveer 60 tot 70 procent van het finale energiegebruik, in combinatie met ondergrondse opslag van enkele tientallen megatonnen CO₂ per jaar.

1

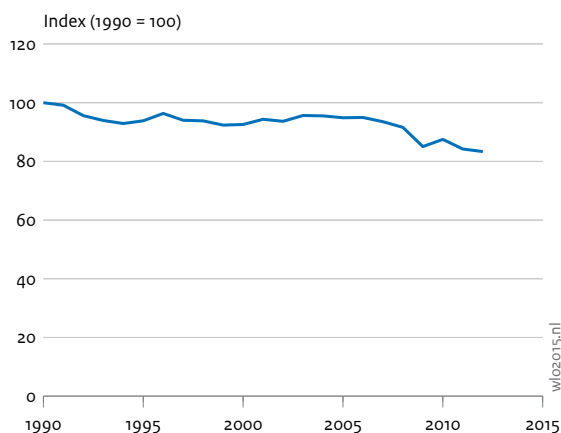
Inleiding

In dit cahier van de Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving verkennen we de toekomstige ontwikkeling van het Nederlandse energiesysteem en de daaraan gerelateerde broeikasgasemissies. Om klimaatverandering en de effecten ervan als gevolg van een toenemende emissie van broeikasgassen¹ te verminderen wordt mondiaal, Europees en nationaal beleid ontwikkeld. Daarbij is het van belang te beseffen dat Nederland en Europa aan de vooravond staan van een trendbreuk in het energiegebruik en de daarbij behorende energieproductie. Hoewel de omvang van deze trendbreuk vooralsnog onduidelijk is, zijn de eerste signalen al zichtbaar in de Europese CO₂-emissie (figuur 1.1). In de 28 lidstaten van de Europese Unie is de CO₂-emissie tussen 2005 en 2012 afgenomen met ruim 12 procent, terwijl de emissie in de vijftien jaar daarvoor min of meer constant was.

Deze trendbreuk is onder andere het gevolg van relatief recent Europees klimaatbeleid.² Zo neemt in Europa sinds 2005 het energiegebruik uit hernieuwbare energiebronnen toe met ongeveer 6 procent per jaar, terwijl het gebruik van zowel olie als kolen en ook gas juist afneemt, elk met 2 tot 3 procent per jaar (EEA 2014). De toekomstige Europese broeikasgasemissies worden echter mede bepaald door de bereidheid van landen en regio's buiten de Europese Unie om tot bindende afspraken te komen met betrekking tot het klimaatbeleid. Zo is het onwaarschijnlijk dat de ambitie van de Europese Unie om haar broeikasgasemissies in 2050 met 80 procent of meer te verminderen wordt gehandhaafd als de rest van de wereld geen vergelijkbare inspanning levert.

Om inzicht te krijgen in de toekomstige ontwikkelingen van het Nederlandse energiegebruik en de energieproductie richten we ons in deze studie in eerste instantie op ontwikkelingen en verwachtingen rond het internationale klimaatbeleid. Het uitgangspunt is daarbij dat het internationale klimaatbeleid op de lange termijn bepalend is voor het Europese klimaatbeleid en dat het Europese klimaatbeleid op zijn beurt bepalend is voor het Nederlandse klimaatbeleid. Europa en Nederland hebben overigens nog wel degelijk ruimte om een eigen koers te varen. Die koers maakt expliciet onderdeel uit van de WLO-scenario's.

Figuur 1.1
Energiegerelateerde emissie van broeikasgassen in EU28



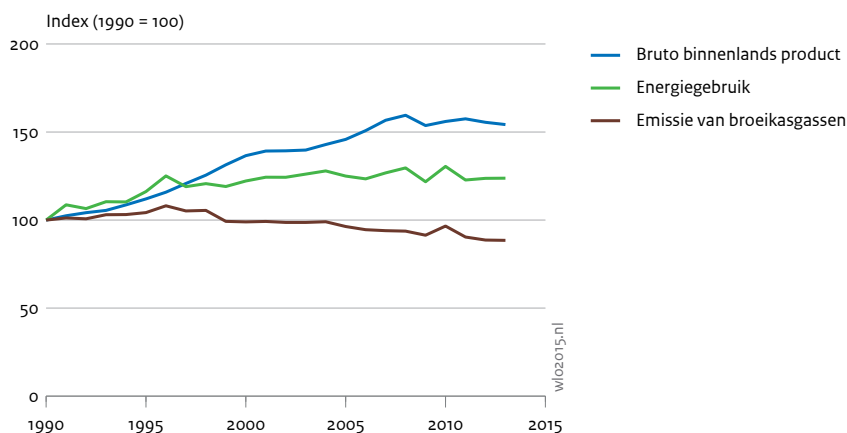
Bron: EEA (GHG viewer)

Op dit moment is de onzekerheid over het toekomstige internationale klimaatbeleid groot. Aan de ene kant hebben vrijwel alle landen het doel onderschreven om de stijging van de wereldwijde gemiddelde temperatuur te beperken tot 2 graden Celsius. Aan de andere kant hebben landen de tot nu toe gemaakte internationale klimaatafspraken nog maar in beperkte mate tot uitvoering gebracht. Deze discrepantie tussen zeg-en-doegegedrag maakt dat het toekomstige internationale klimaatbeleid onzeker is. Toch kan op basis van de bestaande toezeggingen van landen worden aangenomen dat de toekomstige wereldwijde broeikasgasemissies waarschijnlijk gaan dalen (zie bijvoorbeeld de 2020-pledges in UNEP 2013), maar het tweegradendoel blijft daarmee buiten bereik.

Om die (toekomstige) daling van emissies te realiseren is in alle gevallen substantieel klimaatbeleid nodig, ook in Europa en Nederland. De WLO-klimaatscenario's worden om die reden dan ook niet beleidsarm ingevuld. Zij bevatten nationaal klimaatbeleid dat consistent is met het – in het scenario veronderstelde – internationale en Europese klimaatbeleid.

Omdat we voor deze studie consistentie veronderstellen tussen enerzijds het internationale klimaatbeleid en anderzijds het Europese en Nederlandse klimaatbeleid, onderscheiden de scenario's zich vooral in de mate waarin landen bereid zijn om tot internationaal bindende afspraken te komen over het klimaatbeleid. Aangezien de wereldwijde emissie van broeikasgassen tussen 1990 en 2012 met meer dan 40 procent is toegenomen, zal zich in scenario's waarin sprake is van internationaal klimaatbeleid een trendbreuk moeten voordoen in de wereldwijde emissies van broeikasgassen.

Figuur 1.2
Economie, energiegebruik en emissie van broeikasgassen



Bron: Eurostat; Emissieregistratie

In Nederland is de emissie van broeikasgassen in 2012 ten opzichte van 1990 met 11 procent afgenomen. De vraag is hier in welke mate deze daling zich zal voortzetten. Omdat de daling van broeikasgassen in Nederland tussen 1990 en 2012 volledig voor rekening komt van de niet-CO₂-broeikasgassen, gaat het hierbij vooral om de toekomstige ontwikkeling van de CO₂-emissies. Een wereldwijde trendbreuk met betrekking tot de broeikasgasemissies zal in Nederland moeten leiden tot een trendbreuk in de CO₂-emissies. De WLO-scenario's voor klimaat en energie geven zicht op de omvang van deze trendbreuk en de gevolgen hiervan voor het Nederlandse energiesysteem.

1.1 Historisch energiegebruik en broeikasgasemissies

Tijdens de periode 1990-2013 is het Nederlandse energiegebruik gestegen. In de eerste helft van de jaren negentig zelfs sterker dan de economie, daarna bleef de stijging van het energiegebruik achter bij de economische groei. Ten opzichte van de economische groei was er dus energiebesparing. Vanaf 1996 is het energiegebruik min of meer constant, door enerzijds veranderingen in de structuur van de economie (de minder energie-intensieve sectoren zijn sterker gegroeid dan gemiddeld) en anderzijds besparing. Het energiebesparingstempo was tussen 1990 en 2013 gemiddeld ongeveer 1 procent per jaar. De economische crisis van 2008 had een negatief effect op het energiebesparingstempo. Door lagere bezettingsgraden in de industrie werd energie minder efficiënt ingezet (Compendium voor de Leefomgeving 2015). Ook werd er minder energie bespaard doordat investeringen in nieuwe, in de regel efficiëntere, installaties

achterbleven. Figuur 1.2 laat zien dat de economische groei tussen 1990 en 2013 toenam met bijna 60 procent, en het finale energiegebruik met ongeveer 20 procent.

Het aandeel hernieuwbare energie in het finale energiegebruik nam toe van 1 procent in 1990 naar 4,5 procent in 2013. Volgens Europese afspraken moet het Nederlandse aandeel hernieuwbare energie in 2020 14 procent zijn.

De broeikasgasemissie laat tussen 1990 en 2013 een netto daling zien van ongeveer 10 procent. Deze daling komt volledig voor rekening van de daling van niet-CO₂-broeikasgassen, methaan, lachgas en F-gassen. De daling compenseerde zelfs de lichte stijging, met enkele procenten, van de CO₂-emissie tussen 1990 en 2013. De daling van de niet-CO₂-broeikasgassen is het gevolg van enerzijds emissiereductiemaatregelen die werden genomen onder invloed van het klimaatbeleid (Uitvoeringsnota klimaatbeleid 1999) en anderzijds een neveneffect van het landbouwbeleid (melkquotering en mestbeleid).

1.2 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 komen de basisingrediënten aan bod die van belang zijn voor de WLO-scenario's voor klimaat en energie. Zo worden de belangrijkste onzekerheden benoemd en toegelicht in mondiale context; klimaatverandering is tenslotte een mondiaal probleem. Daarnaast zijn de verhaallijnen van de WLO-scenario's Hoog en Laag uitgewerkt. Ook hierbij speelt wat er in de rest van de wereld gebeurt een belangrijke rol. De prijzen voor CO₂ en energiedragers – olie, kolen, gas en biomassa – verschillen per scenario. Deze zijn bepaald voor 2030 en 2050. In het kort wordt toegelicht hoe deze prijzen tot stand zijn gekomen en hoe ze bij de verhaallijnen van de WLO-scenario's passen.

In hoofdstuk 3 is beschreven hoe het Nederlandse energiesysteem verandert gegeven de klimaatopgave per WLO-scenario, in de vorm van emissiereductiedoelen voor broeikasgassen. De ontwikkeling tussen 2013 en 2050 van de energie- en broeikasgasintensiteit geeft op hoofdlijnen de veranderingen van het energiesysteem weer. Meer in detail kijken we hoe het energiegebruik en de emissie van broeikasgassen zich ontwikkelen. De totale inzet van technologieën om broeikasgasemissies te verminderen met hernieuwbare energiebronnen en de afvang en opslag van CO₂ komt per scenario aan bod. Tot slot worden in dit hoofdstuk de resultaten van de WLO-scenario's voor 2030 naast de cijfers van de Nationale Energieverkenning (Schoots & Hammingh 2015) gezet.

Hoofdstuk 4 geeft de resultaten voor de aanvullende onzekerheidsverkenning bij het thema klimaat en energie: 'het tweegradendoel'. Hiervoor zijn twee scenario's uitgewerkt die op twee ruimtelijk verschillende manieren in beeld brengen hoe de Nederlandse energiehuishouding gestalte kan krijgen als in Nederland een verregaande emissiereductie tot stand wordt gebracht, een reductie die past bij een mondiaal tweegradendoel.

De toekomst verkennen met scenario's

Met de studie Welvaart en Leefomgeving (de WLO) werpen het CPB en het PBL een blik in de toekomst: hoe ziet Nederland er uit in 2030 en 2050?

Deze verkenning richt zich op de fysieke leefomgeving, we kijken daarbij naar vier brede thema's: *regionale ontwikkelingen en verstedelijking, mobiliteit, klimaat en energie* en, ten slotte, *landbouw*.

Aangezien niemand echt in de toekomst kan kijken, verkennen de planbureaus de toekomst met behulp van scenario's. Voor de WLO zijn twee scenario's ontwikkeld. Het scenario Hoog combineert een relatief sterke economische groei van ongeveer 2 procent per jaar met een relatief sterke bevolkingsaanwas. In scenario Laag gaat een gematigde economische groei van circa 1 procent samen met een beperkte demografische ontwikkeling. De twee scenario's vormen een bandbreedte waarbinnen zich de toekomst met enige waarschijnlijkheid zal afspelen. De scenario's zijn beleidsarm ingevuld; dat wil zeggen dat er geen nieuw beleid in wordt verondersteld. Ze bieden een kader om na te denken over beleid. Ze helpen om een visie en beleidsdoelen te formuleren. Daarnaast kunnen ze worden gebruikt om de effectiviteit van beleid te toetsen.

Noten

- 1 De in 2014 en 2015 verschenen IPCC Fifth Assessment Reports (AR5) geven de stand van de kennis rond de oorzaken en effecten van en mogelijk te treffen maatregelen tegen klimaatverandering.
- 2 Bijvoorbeeld: het EU Emission Trading System, de Effort Sharing Decision, de Renewable Energy Directive en de Energy Efficiency Directive.

2

WLO-scenario's Laag en Hoog

De WLO-scenario's omvatten de belangrijkste onzekerheden op het gebied van klimaat en energie. Naast het mondiale klimaatbeleid zijn dat het luchtbeleid, de omvang van de voorraden fossiele brandstoffen, de technologische ontwikkeling, de aan- of afwezigheid van geopolitieke spanningen en daarmee de energievoorzieningszekerheid, de acceptatie van nieuwe technologie door de samenleving en de economische ontwikkeling. Van al deze onzekerheden is het mondiale klimaatbeleid in dit WLO-cahier de dominante onzekerheid: zonder mondiaal klimaatbeleid zal de emissie van broeikasgassen blijven stijgen en zal het aandeel van CO₂-arme energietechnologie miniem blijven; met klimaatbeleid zal de emissie van broeikasgassen dalen en kan CO₂-arme technologie de dominante vorm van energieopwekking worden. Geen van de andere genoemde onzekerheden heeft diezelfde potentie. Hoewel zij wel degelijk invloed kunnen hebben op de emissie van broeikasgassen, zijn zij niet in staat de emissie van broeikasgassen in vergelijkbare mate te laten dalen. Zo kan een groter belang van de energievoorzieningszekerheid er bijvoorbeeld toe leiden dat er minder aardgas en aardolie wordt gebruikt. Dit hoeft echter niet per se te leiden tot een daling van de emissies van broeikasgassen, omdat – zonder klimaatbeleid – evenzeer kan worden uitgeweken naar kolen als vervangende energiebron.

In paragraaf 2.1 beschrijven we de onzekerheden die invloed hebben op de energievoorziening in Nederland en Europa. Deze onzekerheden vormen de bouwstenen voor de verhaallijnen bij de scenario's die in paragraaf 2.2 worden besproken.

2.1 Toelichting onzekerheden

Mondiaal klimaatbeleid

De mate waarin het mondiale klimaatbeleid beperkingen oplegt aan de wereldwijde broeikasgasemissies, is voor de klimaat- en energiescenario's in de WLO de dominante onzekerheid. Zo zijn het ambitieniveau en de mate van internationale samenwerking van groot belang voor de ontwikkeling van het Nederlandse energiesysteem en de Nederlandse broeikasgasemissies. Stringent mondiaal en Europees klimaatbeleid zal leiden tot hogere CO₂-prijzen dan minder stringent klimaatbeleid, omdat in het eerste

geval duurdere opties nodig zijn om de gestelde doelen te halen. De hoogte van de CO₂-prijzen zal een grote invloed hebben op de ontwikkeling en de toepassing van CO₂-arme technologieën en kan daarmee een trendbreuk veroorzaken in zowel de energie- als de broeikasgasintensiteit van de economie. Verder is ook de harmonisatie van het nationale en internationale klimaatbeleid van groot belang voor de CO₂-prijzen in Nederland: een lage mate van harmonisatie betekent dat de CO₂-prijzen tussen landen en sectoren van elkaar kunnen verschillen, met als gevolg dat de totale kosten om broeikasgasemissies te bestrijden hoger uitvallen. Stringent internationaal klimaatbeleid kan verder de prijzen van brandstoffen beïnvloeden. Zo zullen de prijzen van fossiele brandstoffen dalen, terwijl de prijs van duurzame biomassa juist zal stijgen.

Luchtbeleid

Naast het mondiale klimaatbeleid kan ook het regionale luchtbeleid van grote invloed zijn op de Nederlandse energiehuishouding. In de eerste plaats zal verregaand Europees luchtbeleid beperkingen opleggen aan de manier waarop fossiele brandstoffen en biomassa in de energieopwekking worden gebruikt. Zo gaat zowel de vergassing van kolen als duurzame biomassa in elektriciteitscentrales gepaard met veel lagere luchtmissies en kan schone technologie in auto's leiden tot een daling van de luchtmissies. Europees luchtbeleid kan ook leiden tot een lager gebruik van fossiele of biobrandstoffen in bijvoorbeeld het wegtransport. Naast Europees luchtbeleid kan ook het luchtbeleid in andere delen van de wereld, zoals China en India, een grote invloed hebben op het Nederlandse energiesysteem. Als deze landen in de toekomst namelijk stringent luchtbeleid gaan voeren, dan zal de inzet van kolen in die landen fors afnemen. Omdat deze landen dan veel minder CO₂ uitstoten, kan een deel van deze emissieruimte toevallen aan de Europese Unie en Nederland. Indien internationale afspraken leiden tot luchtbeleid dat wereldwijd verder gaat dan de huidige emissie-eisen in de Europese Unie en de Verenigde Staten, dan zal dit leiden tot de ontwikkeling van nieuwe en goedkopere schone energietechnologieën.

Omvang voorraden fossiele brandstoffen

Er is grote onzekerheid over de economisch winbare voorraden olie en gas. Deze onzekerheid spitst zich toe op de omvang van de economisch winbare onconventionele voorraden, zoals teerzanden, schaliegas en -olie en methaanhydraten. Veel van deze onconventionele voorraden worden gekenmerkt door hogere winningskosten en een hogere CO₂-emissie per eenheid van energie dan de conventionele voorraden. Naarmate het klimaatbeleid stringenter wordt, zal het gebruik van de onconventionele bronnen waarschijnlijk sterk afnemen. De onzekerheden met betrekking tot deze voorraden hebben een duidelijke regionale dimensie. Zo lijkt de winning van schaliegas in Noord-Amerika minder onzeker dan de winning ervan in China. Of en hoe deze regionale onzekerheden doorwerken op de beschikbaarheid van met name aardgas voor de Europese Unie, is mede afhankelijk van de mate waarin de regionale gasmarkten verder integreren tot één mondiale gasmarkt. Maar ook zonder vergaande integratie van gasmarkten kan, zoals we de laatste jaren hebben gezien, de hogere inzet van gas in de ene regio leiden tot een lagere inzet van gas in een andere regio.

Zo leidde de inzet van grote hoeveelheden schaliegas in Noord-Amerika tot een lagere consumptie van kolen en een lagere kolenprijs. Hierdoor nam het verbruik van (Amerikaanse) kolen in Europese elektriciteitscentrales toe, terwijl het verbruik van gas in Europese gascentrales juist daalde.

Technologieontwikkeling

De ontwikkeling van CO₂-arme technologieën floreert beter in een omgeving waarin in algemene zin sprake is van een snelle technologische ontwikkeling. In dat geval kunnen spillovereffecten vanuit andere technologieën namelijk bijdragen aan de ontwikkeling van CO₂-arme technologie. De ontwikkeling van CO₂-arme technologie wordt echter met name gedreven door beleid gericht op het onderzoek en de ontwikkeling van groene technologieën en (zicht op toekomstig) stringent mondiaal klimaatbeleid. Beide vormen van beleid leiden via leereffecten tot lagere kosten voor CO₂-arme technologie. In die zin is de te bereiken kostendaling deels endogeen of beïnvloedbaar door beleid. Van belang daarbij is dat de kosten van CO₂-arme technologie (uiteindelijk) in lijn komen te liggen met de kosten van op fossiele energie gebaseerde technologie. Omdat ook de kosten van fossiele energie door technologische ontwikkeling blijven dalen – denk bijvoorbeeld aan de snelle ontwikkeling van schaliegas en -olie –, is een extra inspanning voor CO₂-arme technologie nodig om de achterstand te doorbreken (Acemoglu et al. 2009).

De onzekerheid over de maximaal te bereiken kostendalingen is echter groot. Zo is niet duidelijk hoe hoog de kosten van zonnecellen of een elektrische auto zullen zijn in bijvoorbeeld 2040. Niet alleen omdat onduidelijk is hoeveel geld en moeite er in de ontwikkeling van deze technologieën moet worden gestopt, maar ook omdat innovatie inherent onzeker is. Daarom is het verstandig om een brede portefeuille van CO₂-arme technologie tot ontwikkeling te brengen (Aalbers et al. 2013). Energiebesparing is veelal een logische optie, omdat deze tot op zekere hoogte weinig kost. Naarmate de ambitie om te besparen toeneemt, kan deze optie echter kostbaar worden. De onzekerheidsmarge van de kosten per technologie is bij grote emissiereducties groter dan de kostenverschillen tussen de technologieën onderling. Op het punt van de nu voorziene kosten zijn de technologieën dus veelal uitwisselbaar (PBL & ECN 2012). Tot slot is het mogelijk dat er een of meerdere radicale doorbraken zullen zijn, zoals kernfusie en de opslag van grote hoeveelheden energie. Een kenmerk van deze doorbraken is dat ze moeilijk te plannen zijn.

Energievoorzieningszekerheid

Sinds de crisis in Oekraïne staat de energievoorzieningszekerheid in de Europese Unie opnieuw hoog op de politieke agenda. Het gaat dan met name om de beschikbaarheid van gas en, zij het in mindere mate, olie. In Nederland speelt daarnaast dat de eigen productie van aardgas sterk onder druk staat sinds duidelijk is geworden dat het aardbevingsrisico als gevolg van gaswinning veel groter is dan gedacht. De energievoorzieningszekerheid wordt onder meer bepaald door de mate waarin een land fossiele brandstoffen moet importeren, op korte termijn kan overschakelen naar alternatieven of op korte termijn zijn energiegebruik kan verminderen. Door stringent

klimatebeleid zal de import van olie en gas op termijn sterk afnemen, hoewel er qua timing wel behoorlijke (regionale) verschillen kunnen zijn. Bovendien opent een verdere integratie van de gasmarkt de mogelijkheid om – in geval van crisis – elders gas in te kopen. Hierbij moet worden gedacht aan LNG, een verbeterde interconnectie tussen landen en een grotere capaciteit om gas op te slaan. Zowel de verdere integratie van de gasmarkt als het belang van voorzieningszekerheid wordt sterk geopolitiek beïnvloed.

Acceptatie van nieuwe technologie door de samenleving

Voor veel van de nieuwe CO₂-arme technologieën geldt dat er behoorlijke onzekerheden zijn met betrekking tot hun acceptatie. Zo is de acceptatie van nucleaire energie – althans in veel OESO-landen – sinds de kernramp van Fukushima in 2011 afgenomen. Verder maken velen in Europa zich zorgen over de milieuschade van schaliegas, is er weerstand tegen windmolens van omwonenden en maken velen zich zorgen over de ondergrondse opslag van CO₂ op land. De mate van acceptatie verschilt sterk tussen landen. In Polen en het Verenigd Koninkrijk staat men over het algemeen welwillender tegenover de winning van schaliegas dan in Nederland. En in Frankrijk staat men positiever tegenover kernenergie dan in vele andere Europese landen.

Met de acceptatie van technologieën wordt overigens een beperkte invulling gegeven aan het begrip ‘de energieke samenleving’. De energieke samenleving kan ook tot uiting komen in een aangepast gedrag, zoals minder stoken, minder vlees eten, minder vliegen en meer delen van auto’s, en door meer initiatief vanuit lokale gemeenschappen, zoals lokale energie-corporaties.

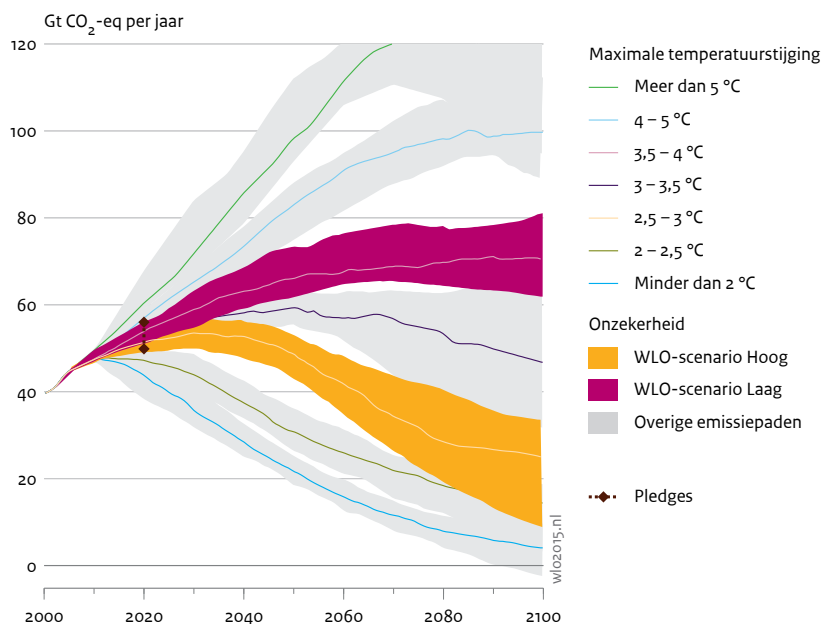
Invloed van de economie op energie- en CO₂-prijzen

Hoewel op lange termijn onzeker is hoe de economische groei zich ontwikkelt, is de impact van die groei op de energie- en CO₂-prijzen vooral op de korte termijn voelbaar. Op de middellange en lange termijn heeft economische groei een veel kleinere impact dan op de korte termijn. De belangrijkste reden hiervoor is substitutie: als een bepaalde fossiele brandstof sterk in prijs stijgt, ontstaat een prikkel om naar alternatieven op zoek te gaan. Een recent voorbeeld hiervan is de ontwikkeling van schaliegas en -olie in de Verenigde Staten. De hoge olieprijs na de financiële crisis van 2008 maakten het rendabel om schalieolie en -gas tot ontwikkeling te brengen. Nu de kostprijs van schalieolie is gedaald van boven de 100 dollar per vat naar ongeveer 60 dollar per vat, is veel schalieolie ook rendabel bij lagere olieprijs. Het einde van deze ontwikkeling is nog niet in zicht. In de toekomst zijn het vooral de ontwikkeling van teerzanden en de conversie van kolen naar olie of gas, al dan niet in combinatie met CO₂-opslag, die een toekomstige prijsstijging van fossiele brandstoffen zullen beperken.

Ook met betrekking tot de CO₂-prijs geldt dat op de lange termijn de economische groei hierop slechts een beperkt effect heeft. Economische groei vergroot weliswaar de reductieopgave, maar allerlei aanpassingsmechanismen in de economie beperken de stijging van de CO₂-prijs. Een van de belangrijkste mechanismen is het naar achteren verschuiven van de emissiereductie zonder daarbij het klimaatdoel los te laten. Hierdoor

Figuur 2.1

Waarschijnlijke mondiale temperatuurstijging gerelateerd aan emissie broeikasgassen



Bron: UNEP Gap Report 2013

is het op korte termijn niet nodig allerlei dure maatregelen te nemen. Dit naar achteren verschuiven van de benodigde emissiereductie is mogelijk, omdat het voor het behalen van een bepaalde temperatuurdoelstelling niet uitmaakt wanneer de emissiereductie plaatsvindt, zolang deze maar plaatsvindt. Bij de mogelijkheid om emissiereductie naar achteren te verschuiven past wel de kanttekening dat dit fysiek nog mogelijk moet zijn. Als de klimaatdoelstelling zodanig bindend is dat de emissies zo snel mogelijk moeten dalen, dan vervalt de mogelijkheid om de emissiereductie naar achteren te verschuiven en zal economische groei wel degelijk leiden tot hogere CO₂-prijzen.

2.2 Verhaallijnen WLO-scenario's Laag en Hoog

De WLO-scenario's sluiten aan bij mondiale klimaatscenario's die op de lange termijn leiden tot een mondiaal gemiddelde temperatuurstijging van 2,5-3 graden in het WLO-scenario Hoog en 3,5-4 graden in het WLO-scenario Laag. De inschatting van de wereldwijde gevolgen van deze temperatuurstijgingen zijn samengevat in de vijfde serie assessmentrapporten van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2015). De specifieke gevolgen voor Nederland zijn uitgewerkt in KNMI en PBL (2015).

Het uitgangspunt bij de scenario's Laag en Hoog zijn de toezeggingen, ofwel *pledges*, die landen tijdens de VN-klimaatonderhandelingen hebben gedaan om broeikasgas-emissies te verminderen (figuur 2.1). De toezeggingen voor 2020 (UNEP 2013) zijn voor een deel voorwaardelijk en hebben daardoor een bandbreedte. In het scenario Hoog veronderstellen we dat alle toezeggingen worden waargemaakt, terwijl in het scenario Laag de basis ligt bij de onvoorwaardelijke toezeggingen. De bijpassende mondiaal gemiddelde temperatuurstijging wordt binnen de aangegeven grote onzekerheidsband in beide scenario's bereikt op de lange termijn.

Hieronder zijn de verhaallijnen van de WLO-scenario's Laag en Hoog uitgewerkt. Tabel 2.1 geeft de belangrijkste verschillen tussen de scenario's.

Verhaallijn scenario Laag

Het WLO-scenario Laag wordt gekenmerkt door een lage economische groei en een beperkte internationale samenwerking, waardoor landen minder bereid zijn hun klimaatbeleid aan te scherpen en te continueren na 2020. De internationale klimaatafspraken voor 2020 en het doel van de Europese Unie om in 2030 de broeikasgassen te hebben gereduceerd met 40 procent ten opzichte van 1990 worden op een weinig stringente wijze uitgevoerd. Rond 2030 wordt duidelijk dat er mondiaal geen bereidheid is om het bestaande klimaatbeleid fors aan te scherpen. Hierdoor koerst de wereld af op een opwarming met ongeveer 3,5-4 graden na de 21^e eeuw.

Voor de ontwikkelde economieën, zoals de Verenigde Staten, de Europese Unie en Japan, betekent dit dat ze hun huidige nationale klimaat- en energiebeleid nog wel voortzetten maar met een laag ambitieniveau, zonder bindende internationale afspraken daarover. Er is weinig bereidheid om klimaatbeleid in ontwikkelingslanden te financieren. Opkomende economieën, zoals China, India en Brazilië, voeren ook klimaat- en energiebeleid, maar dat is vooral gericht op hun eigen nationale ontwikkeling, zoals de aanpak van luchtverontreiniging en een lagere import van fossiele brandstoffen. In de laagontwikkelde economieën wordt geen klimaatbeleid gevoerd tenzij dit hun eigen ontwikkeling heel direct helpt. Ook op andere terreinen wordt na 2020 minder samengewerkt. Een mondiale gasmarkt komt bijvoorbeeld niet tot stand en de internationale lucht- en zeevaart wordt niet opgenomen in het emissiehandelssysteem.

In scenario Laag handhaaft de Europese Unie haar actieve rol op klimaatgebied, maar ze stelt de uitwerking in het beleid van de 40 procent-ambitie rond 2025 naar beneden bij, vanwege een beperkter draagvlak hiervoor, een lagere economische groei en een minder snelle groei van de broeikasemissies. Na 2030 is de ambitie van de Europese Unie om op het gebied van klimaatbeleid een voorloperrol in te nemen, verdwenen. Omdat de rest van de wereld de broeikasgasemissies niet in hetzelfde tempo wil reduceren, is een actieve rol voor de Europese Unie niet langer zinvol. Vanwege een beperkte internationale coördinatie van het klimaatbeleid, is er ook weinig draagvlak bij de Europese industrie om ambitieus klimaatbeleid te voeren.

Binnen de Europese Unie wordt het klimaat- en energiebeleid niet verder geharmoniseerd en wordt de emissieruimte die niet onder het EU-emissiehandelssysteem valt tussen de lidstaten verdeeld, op basis van een verdeelsleutel die is gebaseerd op het bruto binnenlands product per capita. De beleidsmix in de Europese Unie en Nederland blijft deels leunen op subsidiemaatregelen en normstelling. Het duurder maken van de CO₂-uitstoot is daarentegen weinig populair. Hierdoor blijven er tussen sectoren en lidstaten grote verschillen bestaan in de (schaduw)prijzen voor CO₂. De kosten van het klimaatbeleid zijn daardoor hoger dan noodzakelijk.

Luchtkwaliteitseisen worden in de ontwikkelde economieën na 2020 niet of nauwelijks meer aangescherpt. Opkomende economieën scherpen hun luchtkwaliteitseisen nog wel aan (maar minder dan in het scenario Hoog), omdat de luchtkwaliteit daar nog aanzienlijk slechter is dan in de ontwikkelde economieën.

In scenario Laag dalen de kosten van CO₂-arme technologieën niet snel. Er wordt namelijk geen ambitieus klimaatbeleid gevoerd. Daarnaast valt de algemene technologische ontwikkeling in het Lage scenario tegen, waardoor er weinig spillovereffecten zijn. Er zijn geen radicale doorbraken van CO₂-arme technologie. De aanwezige voorraden fossiele brandstoffen (*proven and unproven reserves*) veranderen niet significant ten opzichte van de huidige schattingen daarvan. De winning van schaliegas en -olie vindt voornamelijk plaats in Noord-Amerika. In de Europese Unie worden voorraden schaliegas en -olie marginaal benut als gevolg van de hoge bevolkingsdichtheid. Schaliegaswinning buiten de Europese Unie heeft alleen indirecte invloed op de Europese Unie en Nederland, bijvoorbeeld via lagere prijzen voor kolen. Voor duurzame biomassa geldt juist dat deze ruimer beschikbaar is tegen lagere kosten. Mondiaal is er, vanwege de lagere economische groei en de lagere bevolkingsgroei, namelijk minder concurrentie en meer ruimte voor biomassa. Bovendien is de vraag naar duurzame biomassa laag doordat het klimaatbeleid minder ambitieus is.

De aandacht voor de energievoorzieningszekerheid is in dit scenario relatief groot omdat het minder ambitieuze klimaatbeleid maakt dat landen voor een belangrijk deel afhankelijk blijven van de import van fossiele energie. Verder blijven de gasmarkten regionaal geïntendeerd. Geopolitieke belangen spelen een grote rol, wat een invloed heeft op onder andere gas- en olieprijs. Kolen zijn daarmee geopolitiek gezien aantrekkelijker dan in het scenario Hoog. Er is in het Lage scenario geen weerstand tegen specifieke CO₂-arme technologieën, zoals biomassa, windmolens op zee en land en zonnepanelen.

Verhaallijn scenario Hoog

In het WLO-scenario Hoog zit de economische groei mee en werken landen internationaal goed samen. De internationale klimaatafspraken voor 2020 worden op een ambitieuze wijze verder uitgebouwd. Tot 2030 handhaaft de Europese Unie haar doel om in 2030 40 procent minder broeikasgassen uit te stoten. Na 2030 wordt deze lijn voortgezet: het klimaatbeleid wordt internationaal verder aangescherpt,

zodat de opwarming van het klimaat wordt beperkt tot 2,5-3 graden na de 21^e eeuw. Door de hogere economische groei in scenario Hoog is de samenleving bereid om het klimaatbeleid in internationaal verband te continueren en verder aan te scherpen. Daarmee wordt verondersteld dat klimaatbeleid, vergelijkbaar met ander milieubeleid, een milieu-economische ontwikkeling doorloopt die vergelijkbaar is met de Kutznets-curve: naarmate de economische ontwikkeling vordert, neemt de bereidheid om te betalen voor klimaatbeleid zodanig toe dat de CO₂-emissie daalt.

Voor de ontwikkelde economieën, zoals de Verenigde Staten, de Europese Unie en Japan, betekent dit dat ze aan de vooravond staan van een ambitieus klimaatbeleid. Hetzelfde geldt – zij het met enige vertraging – voor opkomende economieën, zoals China, India en Brazilië. Ook de laagontwikkelde economieën worden geconfronteerd met de milieugevolgen van de economische ontwikkeling, maar hun inkomen is nog zo laag dat andere maatschappelijke problemen voorrang zullen krijgen boven een ambitieus klimaatbeleid.

In scenario Hoog is er bij landen een grote bereidheid om samen te werken. Hierdoor weten landen rond 2025 in mondiaal verband afspraken te maken over een voortzetting en verdere aanscherping van het klimaatbeleid. Ook op andere terreinen wordt eendrachtig samengewerkt, bijvoorbeeld op het gebied van handel en integratie van energiemarkten, zoals gas. Dit leidt tot een grotere efficiëntie en lagere energieprijzen dan in scenario Laag. Lagere energiekosten, snellere technologische ontwikkeling van CO₂-arme technologieën en grotere bereidheid om internationaal samen te werken maken het voor landen acceptabeler om het klimaatbeleid aan te scherpen. Wereldwijd leidt dit tot hogere (schaduw)prijzen van CO₂.

Binnen de Europese Unie wordt het klimaat- en energiebeleid verder geharmoniseerd. Zo worden na 2025 alle sectoren opgenomen in het emissiehandelssysteem (ETS) van de Europese Unie en wordt nationaal vormgegeven klimaatbeleid, zoals de regeling Stimulering Duurzame Energieproductie (SDE+) in Nederland, langzaam afgebouwd. Hiervoor in de plaats komt mondiaal afgestemd beleid gericht op onderzoek en ontwikkeling (R&D) en op de financiering van grootschalige demonstratieprojecten. Enkele jaren na 2030 is er dan sprake van een mondiaal emissiehandelssysteem waarin het Europese systeem wordt opgenomen. Hierdoor verdwijnen verschillen in de schaduwprijs van CO₂-reductie tussen lidstaten van de Europese Unie en sectoren. Zowel in de Europese Unie als daarbuiten scherpen landen hun luchtkwaliteitseisen verder aan, omdat als gevolg van de snel stijgende inkomens de bereidheid toeneemt om te betalen voor schone lucht.

In scenario Hoog dalen de kosten van CO₂-arme technologieën redelijk snel. Dit komt doordat een hogere economische groei in het algemeen de technologische ontwikkeling versnelt, maar ook doordat er ambitieuzer klimaatbeleid wordt gevoerd. Er worden echter geen radicale doorbraken verondersteld.

De aanwezige voorraden fossiele brandstoffen (*proven and unproven reserves*) veranderen niet significant ten opzichte van de huidige schattingen daarvan. De winning van schaliegas en -olie vindt voornamelijk plaats in Noord-Amerika en mogelijk ook daarbuiten (bijvoorbeeld China). In de Europese Unie worden voorraden schaliegas en -olie echter marginaal benut als gevolg van de relatief hoge bevolkingsdichtheid. Door de integratie van gasmarkten profiteert de Europese Unie van goedkoop Amerikaans schaliegas.

Voor duurzame biomassa geldt juist dat deze beschikbaar is tegen hogere kosten. Mondiaal is er namelijk meer concurrentie en minder ruimte voor biomassa vanwege de hogere economische groei en de hogere bevolkingsgroei.

De aandacht voor energievoorzieningszekerheid is in dit scenario beperkt doordat, als gevolg van een ambitieuzer klimaatbeleid, de import van fossiele energie afneemt. De integratie van de energiemarkten leidt ook tot een verbetering van de energievoorzieningszekerheid. Verder is aangenomen dat er geen weerstand is tegen specifieke CO₂-arme technologieën, zoals biomassa, CO₂-opslag, windmolens op zee en land en zonnepanelen.

2.3 Brandstofprijzen

Met betrekking tot de brandstofprijzen kijken we in deze WLO naar de trendmatige ontwikkeling van deze prijzen over de tijd. Deze ‘trendmatige’ prijzen geven een beeld van de mogelijke ontwikkeling van de energieprijzen over een periode van gemiddeld tien jaar. Ze zijn daarmee veel minder volatiel dan de jaargemiddelde spotprijzen voor bijvoorbeeld Brent-olie, die wel 50 procent kunnen afwijken van de tienjaargemiddelde WLO-prijzen.

Historisch gezien lijkt economische groei een relatief geringe impact te hebben gehad op de trendmatige prijzen. Er zijn weliswaar perioden geweest waarin de olie- en gasprijzen fors hoger waren dan in de voorgaande jaren – denk bijvoorbeeld aan de eerste en tweede oliecrisis in de jaren zeventig en tachtig van de vorige eeuw en aan de periode rondom de financiële crisis in deze eeuw –, maar substitutie naar andere bronnen heeft deze prijsstijging weer grotendeels ongedaan gemaakt. Bekende voorbeelden zijn de opkomst van de Noordzeeolie in de jaren tachtig en de opkomst van schalieolie in deze eeuw. In de toekomst zijn het vooral de ontwikkeling van teerzanden en de conversie van kolen naar olie of gas, al dan niet in combinatie met CO₂-opslag, die de trendmatige prijsstijging van fossiele brandstoffen kunnen beperken. Dat laat onverlet dat de olie- en gasprijzen op de korte termijn fors hoger kunnen zijn dan op basis van trendmatige ontwikkelingen mag worden verwacht.

Tabel 2.1

Overzicht van de belangrijkste verschillen tussen de WLO-scenario's Laag en Hoog

	Scenario Laag	Scenario Hoog
Economische groei 2015-2050	Lage groei 1%/jaar (NL) en 3%/jaar (wereld)	Hoge groei 2%/jaar (NL) en 4%/jaar (wereld)
Mondiaal klimaat	3,5-4 °C na 2100	2,5-3 °C na 2100
Internationale samenwerking	Meer geopolitieke spanningen Geringe bereidheid tot internationale samenwerking Rond 2030 wordt duidelijk dat er geen mondiaal klimaatakkoord komt	Minder geopolitiek spanningen Daadkrachtige mondiale samenwerking Rond 2025 wordt een mondiaal klimaatakkoord afgesloten
Invulling klimaatbeleid EU	EU-emissiehandelssysteem wordt niet uitgebreid met andere sectoren Naast het emissiehandelssysteem voeren EU-lidstaten veel ander, nationaal vormgegeven, klimaatbeleid, zoals feed-intarieven, normen en subsidie	Na 2030 is er sprake van een mondiaal emissiehandelssysteem dat alle sectoren omvat Na 2025 wordt nationaal vormgegeven klimaatbeleid langzaam afgebouwd. Er komt mondiaal afgestemd beleid voor R&D en grootschalige demonstratieprojecten voor alle CO ₂ -arme technologieën
Ontwikkeling CO ₂ -arme technologie	Laag tempo	Gematigd hoog tempo
Olie-, kolen- en gasprijs	Hoog	Laag
Biomassaprijs	Laag	Hoog
CO ₂ -prijs	Laag	Hoog
Afname broeikasgasemissies ten opzichte van 1990	30% in 2030 45% in 2050	40% in 2030 65% in 2050

Tabel 2.2

Brandstofprijzen in de scenario's Laag en Hoog²

(Brandstof)prijzen		2013	2030	2050	2013	2030	2050
			Laag	Laag		Hoog	Hoog
Olie	\$/vat	109	135	160	109	65	80
Gas	\$/Mbtu	12	12	15	12	6	7
Kolen	\$/ton	105	115	130	105	85	85
Biomassa	\$/GJ	4	7	14	4	8	28

Prijspeil 2013

In scenario Hoog nemen we aan dat geopolitieke spanningen afwezig zijn en dat de prijzen van fossiele brandstoffen in lijn zijn met de productiekosten. In scenario Laag daarentegen leiden geopolitieke spanningen ertoe dat de prijzen fors hoger zijn dan op basis van de productiekosten mag worden verwacht. Tabel 2.2 geeft het prijsverloop van alle fossiele brandstoffen weer. Dat de brandstofprijzen in scenario Hoog lager zijn dan in scenario Laag lijkt contra-intuïtief: hoge groei leidt (*ceteris paribus*) tot grotere vraag naar fossiele brandstoffen en daarmee tot hogere prijzen. In dit scenario echter is de geopolitieke situatie doorslaggevend voor de prijsontwikkeling. De prijzen komen bovendien verder onder druk te staan door het stringente klimaatbeleid in scenario Hoog, waardoor de vraag naar fossiele brandstof daalt. Ook andere economische en energiemodelstudies bevestigen dit gedrag (Aalbers et al. 2015; Van Vuuren 2012).

De olieprijsen in scenario Laag zijn gebaseerd op de World Energy Outlook (IEA 2014a), en de olieprijsen in scenario Hoog op de International Energy Outlook (IEA 2014). In het Hoge scenario blijft geopolitieke onrust rond grote olieproducenten achterwege, komt de productie van (Noord-Amerikaanse) schalieolie en -gas tot volle wasdom en neemt de vraag naar olie af als gevolg van klimaatbeleid. De olieprijsen na 2040 zijn geëxtrapoleerd op basis van *Energy Technology Perspectives* (IEA 2014b) in scenario Laag en trendmatig in scenario Hoog. De gasprijzen in 2030 en 2050 zijn gekoppeld aan de olieprijsen.

De biomassaprijs in tabel 2.2 is de prijs die gebruikers van biomassa betalen aan de producenten (telers) van biomassa. Het verschil in de prijs voor biomassa tussen de twee scenario's wordt bepaald door de rol die biomassa kan spelen bij stringent klimaatbeleid. Bij stringent klimaatbeleid is het gebruik van biomassa als energiedrager namelijk een effectieve optie om CO₂ uit de atmosfeer te verwijderen. Bij verschillende industriële processen kan de vrijgekomen CO₂ efficiënt worden afgevangen, zoals bij de industriële warmteproductie en bij de centrale opwekking van elektriciteit met biomassa als brandstof. Door de afgevangen CO₂ uit biomassa ondergronds op te slaan kan de CO₂-emissiereductie ruwweg worden verdubbeld ten opzichte van de afvang en ondergrondse opslag van CO₂ (Carbon Capture and Storage, CCS) met fossiele brandstof.

Merk op dat biomassa in het Europese energiesysteem op dit moment een beperkte rol speelt.

In 2050 is de mondiale beschikbaarheid van duurzaam geproduceerde biomassa naar schatting tien keer zo groot als nu: ongeveer 150 exajoule in 2050 ten opzichte van 15 exajoule in 2013 (PBL 2014). Bij de vaststelling van de biomassaprijzen is in tabel 2.2 rekening gehouden met de vraag naar biomassa vanuit de chemische industrie en met de vraag vanuit het energiesysteem. Onzeker is of deze hoeveelheden biomassa op een duurzame manier beschikbaar zullen komen. Ook is onzeker of die biomassa beschikbaar komt voor de energievoorziening, omdat andere toepassingen concurreren met het gebruik als energiedrager. De beschikbare hoeveelheid biomassa is echter onvoldoende om aan de wereldwijde vraag naar transportbrandstoffen te kunnen voldoen.

Verder wordt aangenomen dat er in scenario Hoog een wereldwijde handel is in biomassa. Zonder die handel zou er in Europa een tekort op de markt voor biomassa ontstaan, waardoor de biomassaprijzen veel hoger zouden liggen dan nu voor het Hoge scenario is vastgesteld. In scenario Laag beperkt de handel in biomassa zich wel tot Europa, maar omdat de vraag kleiner is, ligt de prijs van biomassa toch lager dan in het Hoge scenario.

2.4 CO₂-prijzen

Voor de WLO-scenario's zijn de CO₂-prijzen voor 2050 bepaald op basis van de preventiekostenmethode (CE Delft 2010), met behulp van TIMER voor diverse SSP-scenario's (Van Vuuren et al. 2015) en MERGE (Aalbers et al. 2015). Bij de CO₂-prijzen voor 2030 is vervolgens rekening gehouden met de Nationale Energieverkenning (Schoots & Hammingh 2015) die juist de ontwikkeling op de kortere termijn in kaart brengt. Uitgangspunten daarbij waren zowel de in de scenario's veronderstelde klimaatafspraken als het tijdstip en de manier waarop die klimaatafspraken in beleid worden gemaakt en geëffectueerd. Tabel 2.3 geeft van deze uitgangspunten een overzicht.

In scenario Laag blijven de CO₂-prijzen in het Europese emissiehandelssysteem laag. De belangrijkste oorzaak daarvan is het uitblijven van een ambitieus klimaatbeleid. Zo stelt de Europese Unie haar reductiedoel rond 2025 de facto naar beneden bij van -40 naar -30 procent en wordt rond 2030 duidelijk dat de wereld afkoerst op een uiteindelijke temperatuurstijging van 3,5 tot 4 graden. Ook het aanvullende klimaatbeleid en het huidige overschot aan emissierechten blijven bijdragen aan de lage CO₂-prijzen in het emissiehandelssysteem. De CO₂-prijs daarin gaat van 4 euro per ton in 2013 naar 15 euro per ton in 230 en 40 euro per ton in 2050 (tabel 2.4). De kosten van CO₂-emissiereductie in de sectoren die buiten het emissiehandelssysteem vallen, zoals de gebouwde omgeving en transport, liggen aanzienlijk hoger.

Tabel 2.3
Klimaatbeleid in de scenario's Laag en Hoog

	Laag	Hoog
Temperatuurstijging	3,5-4°C	2,5-3°C
Datum mondiale klimaatovereenkomst	±2030	±2025
Emissiereductie NL in 2030	30%	40%
Emissiereductie NL in 2050	45%	65%
Klimaatbeleid	<ul style="list-style-type: none"> - EU stelt haar 2030-doel rond 2025 bij van -40% naar -30% - Het Europese emissiehandelssysteem wordt niet uitgebreid - Aanvullend klimaatbeleid blijft bestaan 	<ul style="list-style-type: none"> - Mondiaal emissiehandelssysteem na 2030 voor alle sectoren - Aanvullend klimaatbeleid wordt na 2030 afgebouwd en vervangen door mondiaal R&D-beleid

Ook in scenario Hoog is tot 2030 sprake van relatief lage prijzen in het emissiehandelssysteem. Pas nadat rond 2025 duidelijk is geworden dat er een ambitieus klimaatbeleid gaat komen, begint de CO₂-prijs te stijgen tot 40 euro per ton. Tot enkele jaren na 2030 is de stijging echter beperkt, omdat er nog steeds sprake is van een initieel overschot aan rechten, en het aanvullende klimaatbeleid de prijzen in het Europese emissiehandelssysteem onder druk blijft zetten. Na 2030 komt er een mondiaal emissiehandelssysteem en krijgen alle sectoren te maken met dezelfde CO₂-prijzen. De CO₂-prijzen stijgt uiteindelijk naar 160 euro per ton in 2050.

De CO₂-prijzen voor 2030 zijn in lijn met de CO₂-prijzen zoals die in de Nationale Energieverkenning (NEV, zie Schoots & Hammingh 2015) zijn toegepast voor het 'vastgesteld en voorgenomen beleid': 20 euro per ton CO₂ binnen een ruime marge van 9 tot 63 euro per ton CO₂. De NEV reikt niet verder dan 2030.

De innovatie in en de toepassing van nieuwe CO₂-arme technologie zullen tot 2030 niet alleen op basis van de CO₂-prijs tijdig op gang komen. Daarvoor is de CO₂-prijs te laag. Additioneel nationaal of internationaal overheidsbeleid is nodig om deze technologieën rond 2030 in te kunnen zetten, zeker in WLO-scenario Hoog.

Bij de vaststelling van de CO₂-prijzen in de WLO-scenario's Laag en Hoog is geen rekening gehouden met luchtbeleid. Omdat veel maatregelen zowel de emissies van broeikasgassen als de emissies naar lucht verlagen, zal luchtbeleid leiden tot lagere CO₂-prijzen (Bollen & Ten Brink 2012). Zeker voor scenario Hoog, waarin sprake is van een aanscherping van het luchtbeleid, kan het effect op de CO₂-prijzen behoorlijk zijn.

Tabel 2.4

CO₂-prijzen in de scenario's Laag en Hoog, in euro per ton CO₂

	2013	2030	2050
Laag	4	15*	40*
Hoog	4	40*	160

Prijspeil 2013

*EU-ETS-prijzen

Noten

- 1 *Pledges* is synoniem met de INDC's in recente UN-klimaatrapportages, Intended Nationally Determined Contributions.
- 2 Elektriciteitsprijzen zullen in het bijbehorende achtergronddocument worden gepubliceerd (zie Matthijsen et al. 2016).

3

Ontwikkelingen van het energiesysteem

De WLO-scenario's Laag en Hoog passen in een wereldbeeld waarin mondiaal gezien de gemiddelde temperatuur op de lange termijn met 2,5 tot 4 graden stijgt. Hieronder worden de scenario's nader ingevuld: op hoofdlijnen, voor de ontwikkeling van de energievraag en het energieaanbod op de lange termijn (2030 en 2050), en de daarbij horende emissie van CO₂, inclusief broeikasgassen die niet direct gekoppeld zijn aan het energiesysteem. De stand van zaken voor het jaar 2013 is daarbij steeds het uitgangspunt (Hekkenberg & Verdonk 2014).

3.1 Op hoofdlijnen

Hieronder geven we – in het perspectief van de historische ontwikkelingen (1990-2013) – de verschillen weer tussen de WLO-scenario's van 2013 tot 2050 in termen van energiegebruik en broeikasgasemissie. We geven een overzicht van de klimaat- en energiedeterminanten bij de WLO-scenario's voor Nederland dat vergelijkbaar is met de zogenoemde Kaya-identiteit (Kaya 1990). Deze determinanten zijn de bevolkingsgroei en welvaarts-groei (euro bbp per capita), de energie-intensiteit van de economie (megajoule per euro bbp), de CO₂-intensiteit van het energiegebruik (kiloton CO₂ per petajoule) en de broeikasgasintensiteit van het energiegebruik (kiloton CO₂-equivalenten per petajoule).

De energie-intensiteit is de verhouding tussen het energiegebruik en de groei van de economie. De energie-intensiteit is een maat voor de jaarlijkse energievermindering als gevolg van een toenemende energie-efficiëntie en energiebesparing. Daalt de energie-intensiteit, dan neemt de energiebehoefte minder sterk toe dan de welvaarts-groei en zijn economische groei en energiegebruik ontkoppeld. In Europa daalde de energie-intensiteit tussen 1990 en 2013 met 1,5 procent per jaar. In Nederland was dit 1,0 procent per jaar (zie tabel 3.1).

De CO₂-intensiteit geeft een maat voor de verduurzaming van het energiesysteem alleen. De productie van energie is in Nederland namelijk veruit de grootste bron van CO₂ door verbranding van fossiele en biobrandstoffen. Ondanks een lichte stijging van de CO₂-emissie tussen 1990 en 2013 is de CO₂-intensiteit afgenomen met 0,8 procent per

Aanpak

De resultaten voor de scenario's Laag en Hoog zijn tot stand gekomen op basis van sectoranalyses en berekeningen met het E-designmodel, waarin de energievraag en het energieaanbod in evenwicht zijn gebracht met technologieën waarmee een vooropgesteld reductiedoel van broeikasgassen kan worden gerealiseerd (Matthijssen et al. 2016). Dit E-designmodel lag ook ten grondslag aan de studie *Naar een schone economie in 2050* (PBL & ECN 2012). De energievraag per sector is bepaald aan de hand van de verschillende WLO-thema's voor de scenario's Laag en Hoog. Bij het vaststellen van de vraag per sector, zoals bij het WLO-cahier *Mobiliteit*, is gebruikgemaakt van de CO₂- en brandstofprijzen die in hoofdstuk 2 worden beschreven. Welke technologische ontwikkelingen precies zullen plaatsvinden, is onzeker. Die onzekerheid neemt sterk toe na 2030. Dan zijn extra inspanningen nodig om de emissie van broeikasgassen verder te verminderen terwijl de energiebehoefte in principe blijft groeien als gevolg van de macro-economische ontwikkelingen. Er is daarom tal van technologische oplossingen mogelijk voor de energieproductie waarmee aan een specifieke energievraag en broeikasgasemissiedoel kan worden voldaan. De invulling van de energiemix in de WLO-scenario's moet, hoewel logisch opgebouwd op basis van de huidige kennis, vooral als illustratie worden gezien. Wel is het zo dat de keuzevrijheid bij de energieproductietechnologieën kleiner wordt naarmate het broeikasgasdoel een grotere emissiereductie vraagt.

jaar, als gevolg van efficiëntere verbrandingsprocessen en de introductie van hernieuwbare energie.

De broeikasgasintensiteit is de verhouding tussen alle broeikasgasemissies in de economie en het energiegebruik. Een daling van de broeikasgasintensiteit kan worden veroorzaakt door de verduurzaming van het energiegebruik, maar kan ook worden veroorzaakt door een daling van de broeikasgasemissies buiten het energiesysteem, de zogenaamde niet-CO₂-broeikasgassen. In Nederland is de broeikasgasintensiteit tussen 1990 en 2013 gedaald met 1,5 procent per jaar. Deze daling is sterker dan die van de CO₂-intensiteit. Dit is het gevolg van de grote reducties van de niet-CO₂-broeikasgassen in die periode.

Binnen Europa is er een enorme verscheidenheid aan CO₂- en broeikasgasintensiteiten. Dat komt doordat landen aanzienlijk verschillen in de mix van technologieën waarmee ze energie produceren. De Nederlandse elektriciteitsproductie was in 2013 in de CO₂-uitstoot vergelijkbaar met die van Duitsland. Hoewel de elektriciteitsproductie uit zon en wind in Duitsland veel groter is dan in Nederland, werd deze duurzame elektriciteitsproductie 'gecompenseerd' door die uit bruinkool, die zeer belastend is voor de CO₂-emissie.

Tabel 3.1

Veranderingen in de energie-intensiteit, de CO₂- en de broeikasgasintensiteit (%/jaar), waargenomen (1990-2013) en volgens de WLO-scenario's (2013-2050)

Periode		Waarneming	WLO-scenario Hoog	WLO-scenario Laag
		1990-2013	2013-2050	2013-2050
Energie-intensiteit	megajoule/euro bbp	-1,0 %/jaar	-2,5 %/jaar	-1,8 %/jaar
CO ₂ -intensiteit	kt CO ₂ /petajoule	-0,8 %/jaar	-2,3 %/jaar	-0,7 %/jaar
Broeikasgasintensiteit	kt CO ₂ -eq/petajoule	-1,5 %/jaar	-2,0 %/jaar	-0,5 %/jaar

Energie-intensiteit in de WLO-scenario's

De energie-intensiteit volgt tussen 2013 en 2050 (tabel 3.1) de dalende trend die sinds 1990 is ingezet. In beide scenario's is echter sprake van een trendbreuk: het tempo waarmee de energie-intensiteit daalt tot 2050 is 1,8 tot 2,5 keer sterker dan die tussen 1990-2013. Deze sterkere daling is het gevolg van een forse toename van de energie-efficiëntie en energiebesparing. In 2050 is de energievraag per euro bbp in scenario Hoog 60 procent en in scenario Laag 50 procent lager dan in 2013 (zie energie-intensiteit in figuur 3.1).

CO₂-intensiteit in de WLO-scenario's

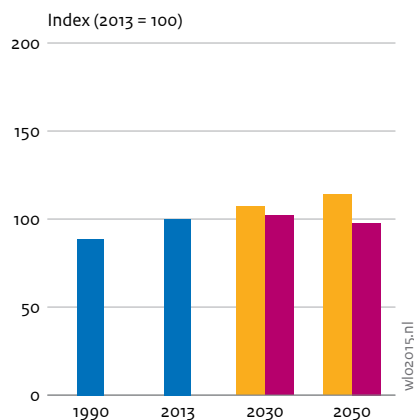
In het Lage scenario zet het huidige tempo waarin de CO₂-intensiteit daalt, zich min of meer voort. In het Hoge scenario daarentegen vindt grofweg een verdrievoudiging plaats van het huidige tempo. Energiesystemen worden niet alleen nog efficiënter, ook is de energieproductie veel schoner als het gaat om de CO₂-emissie. Dat komt doordat veel meer hernieuwbare energie wordt gebruikt en door de afvang en ondergrondse opslag van CO₂ (Carbon Capture and Storage, CCS).

Broeikasgasintensiteit in de WLO-scenario's

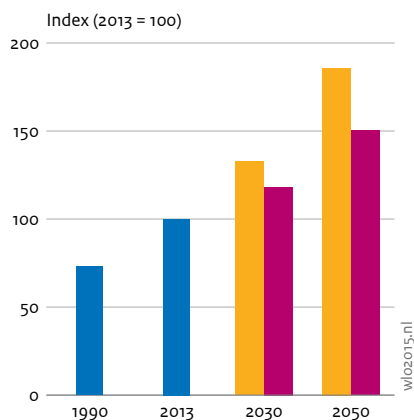
In scenario Laag zakt het tempo waarin de broeikasgasintensiteit daalt: van 1,5 procent per jaar in de periode 1990-2013 naar 0,5 procent per jaar in de periode 2013-2050. In scenario Hoog neemt het tempo in de periode 2013-2050 juist toe, tot 2 procent per jaar. Daarmee ligt het tempo waarin de broeikasgasintensiteit daalt, in dit scenario vier keer zo hoog als in scenario Laag. De emissies van de overige broeikasgassen, zoals methaan en lachgas, zullen nog wel verminderen maar veel minder sterk dan tussen 1990 en 2013. De daling van de broeikasgasemissies komt in beide WLO-scenario's vooral tot stand door een vermindering van de CO₂-emissie. De CO₂-emissie daalt na 2013 anderhalf tot twee keer sneller dan de emissie van de overige broeikasgassen. In 2050 is de broeikasgasemissie per petajoule in scenario Hoog 50 procent en in scenario Laag 20 procent lager dan in 2013 (zie broeikasgasintensiteit in figuur 3.1).

Figuur 3.1
Bevolking, economie, energie en klimaat volgens WLO-scenario's

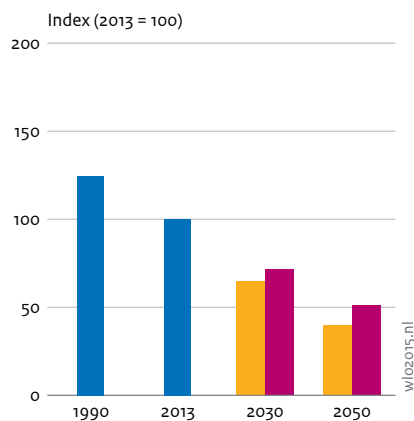
Bevolkingsomvang



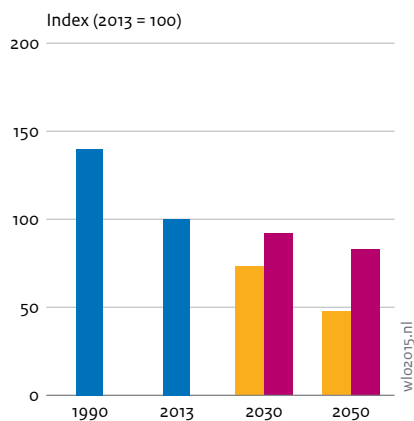
Bruto binnenlands product



Energie-intensiteit



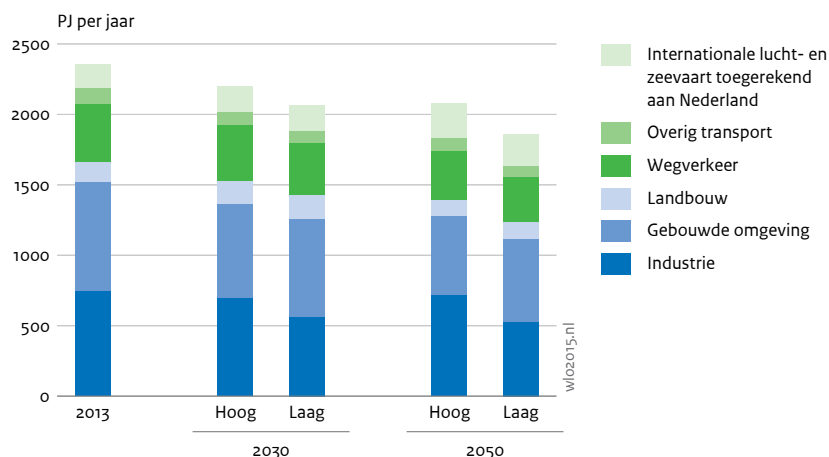
Broeikasgasintensiteit



■ Waarneming ■ Scenario Hoog
■ Scenario Laag

Bron: PBL/CPB; Eurostat; Emissieregistratie

Figuur 3.2
Finaal energiegebruik per sector volgens WLO-scenario's



Bron: PBL/CPB

In het Lage scenario is de groei van de bevolking en de economie als geheel lager dan in scenario Hoog (figuur 3.1). Dat heeft directe gevolgen voor het totale energiegebruik; denk bijvoorbeeld aan de gevolgen voor het energiegebruik in de gebouwde omgeving. Uiteindelijk echter zijn de verschillen tussen het energiegebruik in de twee scenario's opvallend klein. Dit heeft te maken met de transitie die het energiesysteem doormaakt als gevolg van de broeikasgasemissiereductie (45 procent in scenario Laag en 65 procent in scenario Hoog). Een toename van de energie-efficiëntie en een verdere introductie van schone en zuinige energietechnologieën in scenario Hoog compenseren de groeiende energiebehoefte als gevolg van de bbp-groei en de bevolkingsaanwas. In scenario Laag groeit de energievraag veel minder sterk en is de compensatie door de inzet van zuinige en schone technologie ook minder groot.

3.2 Finaal energiegebruik

De energievraag van Nederland is hier uitgedrukt in het finale en het primaire energiegebruik (grondstoffen). Het finale energiegebruik is de hoeveelheid energie die de eindgebruikers gebruiken. Het finale energiegebruik is in deze studie inclusief het eigen gebruik van elektriciteit en warmte door energiebedrijven bij de opwekking ervan. Ook de verliezen die optreden bij de distributie en de transmissie van warmte en elektriciteit worden meegeteld in het finale energiegebruik. Dit is volgens de afspraken in de Europese Richtlijn voor hernieuwbare energie (EC 2009). Zo gaat er stroom verloren in het netwerk, tussen een elektriciteitscentrale en een stopcontact

bij een eindverbruiker. Distributie- en transmissieverliezen bij elektriciteit zijn ongeveer 5 procent. Het binnenlandse finale energiegebruik in 2050 daalt van 2.185 petajoule (figuur 3.2) naar 1.830 petajoule in scenario Hoog en 1.640 petajoule in scenario Laag: een onderling verschil van ongeveer 10 procent. Dit relatief kleine verschil komt doordat de daling van de energie-intensiteit in het Hoge scenario sterker is dan in het Lage scenario (tabel 3.1). Als de historische daling van 1 procent per jaar in beide scenario's zou zijn gehandhaafd, zou het energiegebruik in scenario Hoog in 2050 ongeveer 75 procent en in scenario Laag ongeveer 35 procent hoger zijn uitgekomen ten opzichte van de scenario-uitkomst.

De WLO-scenario's laten een trendbreuk zien ten opzichte van de periode 1990-2013, toen het energiegebruik eerst licht toenam en daarna stabiliseerde (zie figuur 1.2 en 3.2). In de scenario's treedt een absolute ont koppeling op tussen het energiegebruik en de economische groei: een dalend energiegebruik bij een stijgende economische groei.

Per sector zijn er wel verschillen. Bij de gebouwde omgeving en het binnenlands transport is de daling vergelijkbaar met de trend in het totale finale energiegebruik. In beide scenario's is de verwachting dat elektrische auto's de markt opkomen, maar nog niet grootschalig penetreren. In scenario Hoog evenwel zal in 2050 ongeveer 20 procent van de autokilometers elektrisch worden afgelegd. In scenario Laag is de toename van het elektrisch personenverkeer veel beperkter dan in scenario Hoog, omdat de kosten van elektrische auto's daar hoog blijven. Het energiegebruik in de industrie neemt af in scenario Laag, maar blijft – als gevolg van de economische groei – min of meer gelijk aan 2013 in scenario Hoog, wat in deze sector een netto-energiebesparing impliceert van ongeveer 2 procent per jaar.

Het energiegebruik door internationale lucht- en zeevaart toegerekend aan Nederland blijft na 2013 toenemen, als gevolg van de in beide scenario's verwachte volumegroei. Wel neemt die toename vooral in scenario Hoog sterk af, doordat vliegtuigen en schepen nog zuiniger worden. Het energiegebruik door de sector landbouw is relatief klein en blijft dat ook. Het energiegebruik wordt gedomineerd door de glastuinbouw. Ondanks een daling van het areaal is er tot 2030 nog sprake van een groei van het energiegebruik in beide scenario's. Pas na 2030 zal dat energiegebruik gaan dalen.

Hoewel relatief gezien de mix van finale energiedragers (brandstoffen, elektriciteit en warmte) maar beperkt verandert, verwachten we een verdere toename van het elektriciteitsgebruik ten opzichte van 2013. De opwekking van elektriciteit is het snelst (goedkoopst) te verduurzamen. Daarnaast is de verwachting dat het gebruik van warmte uit omgevingsbronnen en de benutting van restwarmte via warmtenetten zal toenemen. Na 2030 wordt er in scenario Hoog meer en meer warmte en elektriciteit gebruikt in plaats van gas en transportbrandstoffen. De grote veranderingen zitten in de mate van duurzaamheid van de elektriciteits-, warmte- en (groen)gasproductie.

Internationale lucht- en zeevaart

De CO₂-emissie door het Nederlandse deel van de internationale lucht- en zeevaart maakt geen onderdeel uit van de bestaande broeikasgasreductiedoelen en ook niet van de WLO-scenario's. Toch is in alle scenario's een schatting gemaakt van het energiegebruik en de CO₂-emissie van het aandeel dat Nederland heeft in de internationale lucht- en zeevaart. De internationale lucht- en zeevaart is een sector die nu nog niet wordt meegenomen in de afspraken over de reductiedoelen voor broeikasgassen. Tegelijkertijd kent deze sector door zijn grootteorde, aard van energiegebruik en verwachte groei een extra uitdaging om de CO₂-emissies te beperken. De schatting voor het Nederlandse aandeel is gemaakt door 1 procent te nemen van het mondiale energiegebruik door de internationale lucht- en zeevaart. Dit is gelijk aan het aandeel dat het Nederlandse bbp heeft in het mondiale bbp. In het scenario Hoog is verondersteld dat de internationale lucht- en zeevaart ook onderdeel worden van een efficiënt vormgegeven internationaal klimaatbeleid.

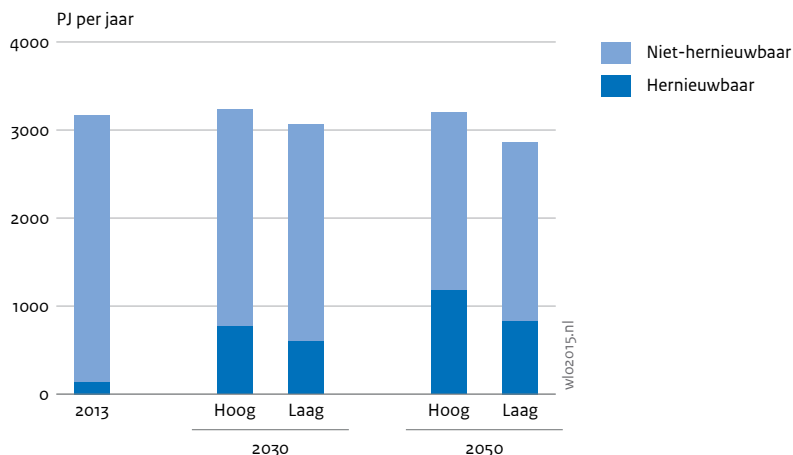
3.3 Primair energiegebruik

De ontwikkeling in de WLO-scenario's van primaire energie (figuur 3.3) laat zien dat tussen 2013 en 2050 het gebruik van energiedragers verandert. Het primaire energiegebruik is het totaal aan energiedragers dat wordt ingezet om het energiesysteem te voeden. Het bestaat naast het finale energiegebruik uit het niet-energetische gebruik van energiedragers voor bijvoorbeeld de productie van plastics en kunstmest en de omzettingsverliezen van de energieproductie. Omzettingsverliezen dalen door efficiëntieverbeteringen en door meer inzet van hernieuwbare energiebronnen als wind en zon. Bij de omzetting van biomassa in energie is wel sprake van omzettingsverliezen.

Het 'niet-hernieuwbare' primaire energiegebruik bestaat bijna helemaal uit fossiele energiedragers (kolen, olie en aardgas), met een zeer kleine restpost van uranium, netto-import of -export van elektriciteit en energie uit niet-hernieuwbare afvalstromen. De 'hernieuwbare' energiedragers zijn biomassa (inclusief biogas) en andere hernieuwbare dragers zoals energie uit wind en zon, aardwarmte en warmte uit de lucht via de inzet van warmtepompen.

In 2013 is het aandeel niet-hernieuwbare energiedragers ongeveer 95 procent. In 2030 is het aandeel afgenomen tot ongeveer 75 procent in scenario Hoog en 80 procent in scenario Laag. In 2050 is het aandeel verder afgenomen, tot ongeveer 60 procent in Hoog en 70 procent in Laag. De daling van de niet-hernieuwbare energiedragers vindt

Figuur 3.3
Primair energiegebruik volgens WLO-scenario's



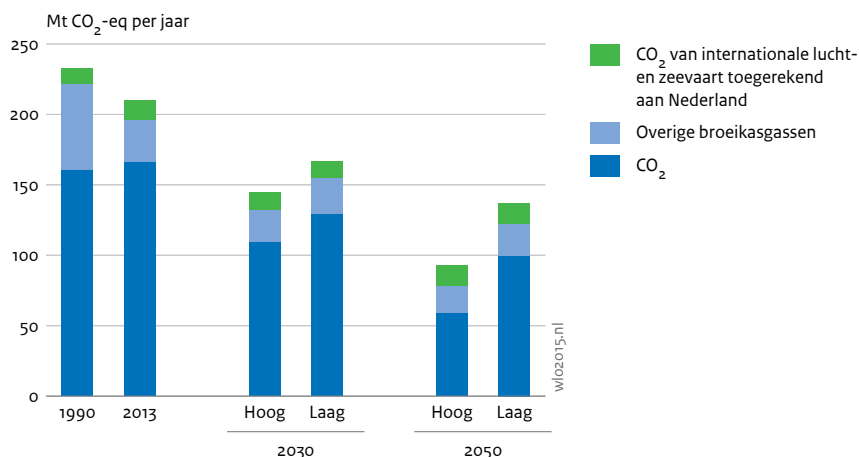
Bron: PBL/CPB

vooral plaats bij kolen en aardgas en veel minder bij olie. Dat komt door de inzet van olie als grondstof voor niet-energetische toepassingen zoals de productie van plastics, al is hierbij ook rekening gehouden met de inzet van biomassa. De vraag naar olie, inclusief die naar olie als grondstof, blijft in beide scenario's ongeveer even groot als in 2013.

De vraag naar aardgas neemt af en is in 2050 naar schatting nog maar de helft van de vraag in 2013. In de WLO-scenario's is verondersteld dat aan de vraag naar aardgas in principe kan worden voldaan. Er is expliciet geen onderscheid gemaakt tussen binnenlandse productie of import. De daling van het gebruik van aardgas hangt daarom niet samen met de productie maar is het gevolg van de aannames om tot een duurzamer energiemix te komen.

De inzet van hernieuwbare energiedragers, energie uit omgevingsbronnen en biomassa neemt sterk toe en vult het gat dat wegvalt bij de fossiele energiedragers. De inzet van uranium is constant verondersteld. In de WLO-scenario's is de inzet van kernenergie in Nederland klein verondersteld: minder dan de 43 petajoule in 2013 (Hekkenberg & Verdonk 2014). Kernenergie is wat betreft de CO₂-emissie in principe uitwisselbaar met hernieuwbare elektriciteit (bijvoorbeeld uit wind en zon). De kosten van kernenergie als technologie zijn moeilijk in te schatten. Zo kunnen de verwijderingskosten van een kerncentrale hoog oplopen, nog los van de kosten die gepaard gaan met de langdurige opslag van radioactief afval.

Figuur 3.4
Emissie van broeikasgassen volgens WLO-scenario's



Bron: PBL/CPB

3.4 Emissie van broeikasgassen

Het klimaateffect van de WLO-scenario's, de totale emissie van broeikasgassen, vormt per scenario een randvoorwaarde voor het energiesysteem. De verdeling tussen 'CO₂' en 'Overige broeikasgassen' is echter een belangrijk resultaat in deze studie. Figuur 3.4 laat zien dat in de WLO-scenario's het aandeel van de overige broeikasgassen in relatieve zin is toegenomen in 2050. Deze procesemissies, zoals methaan door koeien en lachgas als gevolg van landgebruik, zijn tussen 1990 en 2013 al ongeveer gehalveerd.

De CO₂-reductie (figuur 3.4) is tot stand gekomen door een combinatie van energiebesparing, inzet van hernieuwbare energiebronnen en – bij scenario Hoog – CCS. De energie-efficiëntie kan ook verbeteren bij een transitie naar meer hernieuwbare energieopwekking, zoals elektriciteit uit wind en zon.

3.5 Hernieuwbare energie

In beide scenario's neemt de hoeveelheid energie uit hernieuwbare bronnen toe (zie figuur 3.3). De doelstelling voor hernieuwbare energie, zoals die in het Energieakkoord en de Nationale Energieverkenning wordt behandeld, is volgens Europese richtlijnen op basis van het aandeel in het finale energiegebruik (zonder het energiegebruik door internationaal transport). In 2030 is in scenario Hoog 29 procent van het finale energiegebruik hernieuwbaar en in scenario Laag ongeveer 21 procent. In 2050

is het aandeel in beide scenario's verder toegenomen, tot 48 procent in scenario Hoog en 38 procent in scenario Laag.

3.6 Afvang en ondergrondse opslag van CO₂ (CCS)

De twee WLO-scenario's onderscheiden zich van elkaar in de toepassing van CCS. Deze technologie wordt namelijk alleen toegepast in het scenario Hoog. In het scenario Laag is verondersteld dat de CO₂-prijs waarschijnlijk te lang te laag blijft om ondergrondse opslag op tijd rendabel te maken. Volgens huidige schattingen is CCS als techniek rendabel inzetbaar bij een CO₂-prijs vanaf enkele tientallen euro per ton CO₂. Doordat in scenario Laag het animo om veel klimaatbeleid te voeren in de loop van de tijd afneemt, is verondersteld dat in dit scenario ook na 2030 geen CCS wordt ingevoerd. In scenario Hoog vindt CCS al plaats in 2030. Dat betekent dat in dit scenario CCS-demonstratieprojecten ruim voor 2030 hun intrede moeten hebben gedaan. Demonstratieprojecten zijn nodig om op tijd voldoende opslagcapaciteit te verkrijgen. In het scenario Hoog wordt in 2030 jaarlijks 19 megaton CO₂ opgeslagen en in 2050 33 megaton CO₂. Hierdoor is de totale emissie van broeikasgassen in 2050 niet 111 megaton CO₂-equivalent (50 procent minder dan in 1990), maar 78 megaton CO₂-equivalent (65 procent minder dan in 1990).

3.7 De WLO-scenario's en de NEV

De Nationale Energieverkenning (NEV) geeft sinds 2014 jaarlijks een breed en feitelijk overzicht van de ontwikkelingen in de Nederlandse energiehuishouding. De NEV geeft prognoses van die ontwikkelingen op basis van vastgesteld en voorgenomen beleid voor de relatief korte termijn tot 2030. De energieverkenning verschilt daarmee wezenlijk van de WLO-scenario's voor klimaat en energie. In de scenario's Hoog en Laag schetst de WLO plausibele paden die de belangrijkste onzekerheden opspannen en zich bij uitstek richten op de langere termijn, richting 2050. Het gevoerde klimaatbeleid geldt als belangrijkste onzekerheid in de scenario's. Deze onzekerheid is sturend voor de mate waarin de energietransitie naar een duurzamere energievoorziening plaats vindt. Daarnaast zijn de bbp-groei en de bevolkingsaanwas belangrijke drijvende krachten voor de groeiende energievraag. Deze drijvende krachten verschillen in de twee WLO-scenario's.

Hoewel de opzet van de NEV (Schoots & Hammingh 2015) en de WLO verschilt, is het nuttig om de verschillen in beeld te brengen. Tabel 3.2 geeft een overzicht van een aantal kernindicatoren voor de energiehuishouding. Het WLO-scenario Laag heeft het meest weg van de NEV 2015-prognose. Een belangrijk verschil is echter dat de in de NEV verwachte bbp-groei en bevolkingsaanwas groter zijn dan die in Laag. Dit leidt tot een groter energiegebruik en maakt dat de grotere inspanningen nodig zijn om eenzelfde percentage broeikasgassen te verminderen. Dit illustreert ook de inspanningen die

Tabel 3.2

Kernindicatoren voor 2030 uit de Nationale Energieverkenning 2015 voor het vastgesteld en voorgenomen beleid en de WLO-scenario's Hoog en Laag

		NEV 2015 Vastgesteld beleid	NEV 2015 Vastgesteld en voorgenomen beleid	WLO-scenario Hoog	WLO-scenario Laag
Broeikasgasreductie t.o.v. 1990	Procent		21	40	30
Bbp-groei	Procent per jaar		1,4	2,1	1,1
Bevolking	Miljoen inwoners		17,7	18,1	17,1
Olieprijs	Dollar per vat		140	65	135
CO ₂ -prijs	Euro per ton	15	20	40	15
Bruto finaal energiegebruik	Petajoule*	2.070	2.030	2.020	1.880
Hernieuwbaar	Petajoule*	400	380	590	400
Aandeel hernieuwbaar	Procent		19	29	21

* afgerond op tientallen.

nodig zijn om in scenario Hoog, met een bbp-groei van 2 procent per jaar en een verdere toename van het inwonertal, de broeikasgasemissie in 2030 te hebben beperkt tot 65 procent ten opzichte van 1990. Grotere reducties – bijvoorbeeld om op een pad te komen dat, onder de economisch optimistische omstandigheden van Hoog, leidt tot de mondiale tweegradendoelstelling – vergen dan enorme inspanningen. Een energietransitie is een evenwicht tussen enerzijds de groeiende energievraag en anderzijds de internationale technologische en sociaaleconomische ontwikkelingen die bepalen hoe duurzaam aan die vraag kan worden voldaan. Overheden kunnen hierbij een belangrijke rol spelen door nieuwe duurzame technologieën te stimuleren zolang deze nog onvoldoende rendabel zijn.

De verschillen tussen de WLO en de NEV zijn een logisch gevolg van de uitgangspunten. In beide WLO-scenario's is het energiesysteem verder verduurzaamd dan volgens de prognose van de NEV (2015). De WLO-scenario's gaan uit van het EU-brede broeikasgasreductiedoel voor 2030 ten opzichte van 1990. In scenario Hoog wordt dat doel van 40 procent bereikt, maar in Laag wordt het bijgesteld naar 30 procent, overeenkomstig de verhaallijn waarin de internationale vorderingen rond het klimaatbeleid gaan haperen. Desalniettemin is een broeikasgasemissiereductie van 30 procent nog steeds meer dan de huidige verwachting, op basis van het vastgesteld en voorgenomen beleid, van 21 procent voor 2030 (tabel 3.2).

4

Energietransitie bij twee graden-scenario's

Tijdens de VN-klimaatbijeenkomst in Bonn (juni 2015) hebben landen zich opnieuw gecommitteerd aan het doel om de wereldwijde gemiddelde temperatuurstijging deze eeuw te beperken tot 2 graden ten opzichte van pre-industriële waarden. Beleid om de grens van 2 graden daadwerkelijk in acht te nemen, is nog maar beperkt op gang aan het komen. Op de VN-klimaatconferentie in Parijs (november/december 2015) worden mogelijk nieuwe stappen gezet om de mondiale klimaatverandering te beperken, maar de uitkomsten van de top zijn bij het schrijven de WLO nog niet bekend. Als we uitgaan van de bestaande toezeggingen van landen om de broeikasgassen te verminderen, komt de wereld op de lange termijn waarschijnlijk uit op een gemiddelde temperatuurstijging van 2,5 tot 4 graden. Dat is dus hoger dan het twee gradendoel dat de stip op de horizon is voor het nationale en internationale klimaat- en energiebeleid. Daarom hebben we een aanvullende onzekerheidsverkenning uitgevoerd. In twee zogenaamde 'twee gradenscenario's' schetsen we denkbare realisaties van het twee gradendoel. In deze aanvullende scenario's brengt Nederland in 2050 een vermindering van de broeikasgasemissies tot stand van 80 procent ten opzichte van 1990.

In de WLO is de aanvullende onzekerheidsverkenning rond de twee gradendoelstelling een scenario dat, afgezien van efficiëntieverbetering en de broeikasgasreductie, dezelfde uitgangspunten heeft als het WLO-scenario Hoog. Het gaat hierbij onder andere om de bevolkingsgroei en economische ontwikkeling. Het twee gradenscenario is op twee ruimtelijk verschillende manieren uitgewerkt: Centraal en Decentraal. Hoewel het WLO-scenario Laag ook als uitgangspunt voor de twee gradenscenario's zou kunnen dienen, hebben we ervoor gekozen om hierbij aan te sluiten op de verhaallijn van het Hoge scenario, waarin al veel aan klimaatbeleid gebeurt. Het grote verschil tussen de twee gradenscenario's en het Hoge scenario is de extra beperking op de broeikasgasemissie. Om de extra 15 procent emissiereductie te realiseren (65 procent → 80 procent) zijn er ingrijpendere en duurere maatregelen nodig, wat zijn weerslag zal hebben op de CO₂-prijs.

Tachtig procent vermindering broeikasgassen in Nederland: een tweegradenscenario?

Wat is de opgave voor Nederland in een wereld waarin op de lange termijn het tweegradendoel wordt bereikt? Die opgave is groot, maar de vraag wat dit precies betekent voor het energiesysteem van Nederland kan niet eenduidig worden beantwoord. Het emissiepad dat nodig is om de mondiale temperatuurstijging te beperken tot 2 graden op de lange termijn is namelijk erg onzeker (IPCC 2015). Daarnaast laten modelstudies zien dat het emissiepad mondiaal onder allerlei uiteenlopende sociaaleconomische randvoorwaarden kan worden bereikt (Van Vuuren et al. 2015). In deze WLO-studie is daarom voor een eenvoudige benadering gekozen: een tweegradenscenario is hier voor Nederland vertaald in een vaste broeikasgasemissiereductie van 80 procent in 2050 ten opzichte van 1990. Hiermee geeft de aanvullende onzekerheidsverkenning een indicatie van de mogelijke gevolgen voor het Nederlandse energiesysteem wanneer wordt ingezet op een grote vermindering van de broeikasgasemissies op mondiale schaal om de opwarming van de aarde te beperken tot 2 graden. Dit tweegradenscenario is op twee manieren ruimtelijk uitgewerkt.

Volgens de huidige inzichten vergt een tweegradendoel dat de mondiale broeikasgasemissies in 2050 zijn teruggebracht met 40 tot 70 procent ten opzichte van 2010. Hoe groot de bijdrage van landen moet zijn aan deze vermindering, is onderwerp van de VN-klimaatonderhandelingen. Als speler bij de mondiale klimaatafspraken heeft de Europese Unie hierbij een eigen klimaatambitie geformuleerd: emissievermindering van broeikasgassen met 80 tot 95 procent in 2050 ten opzichte van 1990. Een broeikasgasreductie van 80 procent in Nederland is het minimum van deze range.

4.1 CO₂-prijzen

De onzekerheid in de hoogte van de CO₂-prijs neemt sterk toe naarmate de emissiereductie groter wordt. Dat is een logische ontwikkeling omdat er steeds verdergaande, nog niet genomen, maatregelen worden verlangd. Dit blijkt onder andere uit een studie voor de Europese Unie op basis van meerdere modellen met een emissiereductie van 40 procent en van 80 procent (Knopf et al. 2013). Daarnaast is het sowieso onzeker wat de tweegradendoelstelling voor de Europese Unie en Nederland gaat betekenen in termen van emissiereductie; met een range van 80 tot zelfs meer dan 95 procent wordt rekening gehouden.

Voor de tweegradenscenario's in de WLO geven we daarom een bandbreedte van CO₂-prijzen (tabel 4.1). Deze bandbreedte is gebaseerd op modelberekeningen voor 2050 met emissiereducties van 80 procent en meer dan 95 procent voor de Europese Unie als geheel (Matthijssen et al. 2016). De CO₂-prijzen lopen uiteen van 100-500 euro

Tabel 4.1

Onder- en bovenwaarden voor de CO₂-prijs in een tweegradenscenario (euro per ton CO₂)

	2013	2030	2050
Tweegradenscenario	4	100-500	200-1.000

Prijspeil 2013

per ton CO₂ in 2030 tot 200-1.000 euro per ton CO₂ in 2050. Volgens onze inzichten passen de CO₂-prijzen aan de onderkant van deze bandbreedte waarschijnlijk het best bij een Nederlandse en Europese CO₂-reductiedoelstelling van 80 procent in 2050. Prijzen aan de bovenkant van de bandbreedte komen in beeld als de emissies vanaf 2050 omlaag moeten met 95 procent en meer.

Wat opvalt, is dat de CO₂-prijs voor 15 procent extra CO₂-reductie in 2050 (65 procent → 80 procent) in de tweegradenscenario's slechts beperkt hoger is dan die in het scenario Hoog (tabel 2.4): 200 respectievelijk 160 euro per ton CO₂. Daartegen is de CO₂-prijs in 2030 wel fors hoger: 100 in plaats van 40 euro per ton CO₂. Dit heeft te maken met de timing van het klimaatbeleid. Het klimaatbeleid komt in scenario Hoog pas vanaf 2025 echt op gang. Voor het tweegradenscenario is het echter nodig het klimaatbeleid zo snel mogelijk aan te scherpen.

Bij een reductiedoelstelling van 80 procent en een CO₂-prijs van 200 euro per ton CO₂ wordt relatief zwaar geleund op technische maatregelen om de reductiedoelstelling te halen. Ter vergelijking: 200 euro per ton CO₂ zorgt voor een ongeveer 50 eurocent extra kosten per liter benzine. Bij een reductiedoelstelling van 95 procent of meer kunnen in aanvulling daarop maatregelen nodig zijn die tot substantiële gedragsveranderingen leiden, zoals minder kilometers rijden en minder vlees eten. In dat geval nemen de negatieve welvaartseffecten van het klimaatbeleid sterk toe.

4.2 Tweegradenscenario's: Centraal en Decentraal

Het tweegradenscenario is voor deze WLO op twee verschillende manieren uitgewerkt. De uitwerkingen geven op ruimtelijk verschillende manieren een beeld van hoe de Nederlandse energiehuishouding gestalte zou kunnen krijgen als wereldwijd wordt voldaan aan het tweegradendoel. De ruimtelijke claim van hernieuwbare energiebronnen en de maatschappelijke acceptatie daarvan verschillen onderling sterk in de twee scenario's. Zo kennen zonnepanelen op dit moment nauwelijks weerstand, terwijl windmolens in de omgeving waar ze kunnen komen te staan vaak op weerstand stuiten. Daarbij maakt het ook nog uit of het windmolens zijn op land of op zee. Het is onzeker hoe deze voorkeuren zich in de toekomst zullen ontwikkelen.

Bij het zogenoemde tweegradenscenario Centraal ligt het accent in de energiemix op centrale energieopwekking, in het tweegradenscenario Decentraal op decentrale energieopwekking en ook op nog meer energie-efficiëntie gedreven door lokale actoren en uitgewerkt voor sectoren (Matthijssen et al. 2016). Het scenario Centraal wordt gekenmerkt door een grote inzet van de afvang en ondergrondse opslag van CO₂ (CCS), energie uit biomassa en collectieve warmtenetten voor de glastuinbouw en de gebouwde omgeving met transport van aardwarmte en restwarmte uit de industrie. Het scenario Decentraal verschilt van Centraal in de inzet op nog meer energiebesparing, onder andere door verdergaande elektrificatie, minder fossiele brandstoffen en een andere technologiemix van hernieuwbare energiebronnen.

De extra energiebesparing in het tweegradenscenario Decentraal ten opzichte van Centraal vindt plaats in alle eindgebruikssectoren. In de gebouwde omgeving gebeurt dit door grootschalige renovatie van bestaande woningen en utiliteitsgebouwen tot Nul op de Meter-gebouwen met verwarming via elektriciteit. In de verkeerssector wordt het wagenpark nog efficiënter, onder andere doordat er meer elektrische personenauto's komen. De industrie wordt nog energie-efficiënter. In de glastuinbouw neemt niet alleen de energie-efficiëntie toe, maar worden ook geothermie en warmte-koudeopslag grootschalig toegepast. In de overige landbouw wordt de emissie van methaan verder beperkt door land- en mestbewerkingsmaatregelen en voedselaanpassingen.

In de tweegradenscenario's neemt het gebruik van fossiele brandstoffen, dat wil zeggen kolen, olie en aardgas, af vergeleken met het scenario Hoog terwijl dat van hernieuwbare energie sterk groeit. Een lager energiegebruik in het tweegradenscenario Decentraal uit zich in een lager gebruik van fossiele brandstoffen vergeleken met het tweegradenscenario Centraal. De absolute inzet van hernieuwbare energie is in de tweegradenscenario's ongeveer gelijk. De mix van hernieuwbare energiebronnen, en daarmee het beslag op de ruimte, verschilt echter wel:

- er zijn meer windmolens op zee in het tweegradenscenario Centraal en meer windmolens op land in het tweegradenscenario Decentraal;
- er is minder zon-PV in het scenario Centraal dan in het scenario Decentraal;
- de hoeveelheid energie uit biomassa in combinatie met CCS is groter in het scenario Centraal dan in het scenario Decentraal;
- de hoeveelheid kleinschalige energieopwekking uit biomassa is kleiner in het scenario Centraal ten opzichte van het scenario Decentraal;
- de inzet van aardwarmte (geothermie) in de landbouw en de gebouwde omgeving is groter in het scenario Centraal dan in het scenario Decentraal;
- de mate van elektrificatie is kleiner in het scenario Centraal dan in het scenario Decentraal, met name door het gebruik van minder elektrische en plug-in hybride personenauto's en minder elektrische warmtepompen in de industrie en de gebouwde omgeving.

Tabel 4.2

Verandering in de energie-intensiteit, de CO₂-intensiteit en de broeikasgas-intensiteit (%/jaar) volgens het WLO-scenario Hoog en de tweegradenscenario's Centraal en Decentraal

Periode		Waarneming	WLO-scenario Hoog	Tweegradenscenario Centraal	Tweegradenscenario Decentraal
		1990-2013	2013-2050	2013-2050	2013-2050
Energie-intensiteit	megajoule/euro BBP	-1,0 %/jaar	-2,5 %/jaar	-2,8 %/jaar	-3,2 %/jaar
CO ₂ -intensiteit	kt CO ₂ /petajoule	-0,8 %/jaar	-2,3 %/jaar	-4,1 %/jaar	-3,5 %/jaar
Broeikasgasintensiteit	kt CO ₂ -eq/petajoule	-1,5 %/jaar	-2,0 %/jaar	-3,2 %/jaar	-2,8 %/jaar

De ontwikkelingen van het energiesysteem in de beide tweegradenscenario's zijn een indicatie van de energietransitie die mogelijk is bij een reductie met 80 procent van de broeikasgassen. Hieronder worden de resultaten gepresenteerd en kort uitgewerkt op een wijze die vergelijkbaar is met de uitwerking van de WLO-scenario's Hoog en Laag in hoofdstuk 3. Waar mogelijk worden de beide tweegradenscenario's vergeleken met de resultaten van het WLO-scenario Hoog (dat dezelfde bevolkingsgroei en economische ontwikkeling kent als de tweegradenscenario's).

Ontwikkelingen op hoofdlijnen

Het tempo waarin de energie-intensiteit tussen 2013 en 2050 verandert in de tweegradenscenario's, is een voortzetting van de dalende trend die al sinds 1990 is ingezet (tabel 4.2). Ten opzichte van het tempo in de periode 1990-2013 neem de energie-intensiteit in deze scenario's jaarlijks nog sterker af dan in scenario Hoog. De CO₂-intensiteit in de tweegradenscenario's daalt tussen 2013 en 2050 vier tot vijf keer sneller dan tussen 1990 en 2013. De intensiteit van alle broeikasgassen tussen 2013 en 2050 laat ongeveer een verdubbeling in tempo zien ten opzichte van de periode 1990-2013.

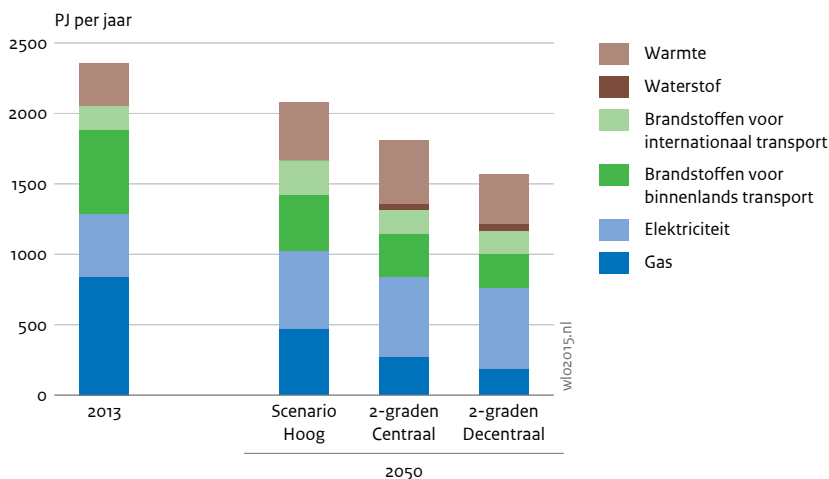
Finaal energiegebruik

Het binnenlandse finale energiegebruik daalt (figuur 4.1) tussen 2013 en 2050: met 16 procent in scenario Hoog, met 25 procent in het scenario Centraal en met 36 procent in het scenario Decentraal.

Bij het finale energiegebruik per energiedrager bestaat 'Gas' uit aardgas en biogas dat is gemaakt uit biomassa, meestal door vergisting van mest en landbouwgewassen of vergassing van droge houtachtige gewassen. 'Warmte' is het finale gebruik van warmte: restwarmte uit de industrie en elektriciteitscentrales, warmte uit warmtekrachtkoppeling (WKK) en hernieuwbare omgevingswarmte die uit lucht, water of bodem wordt gewonnen door zonneboilers en veelal warmtepompen. 'Waterstof' wordt geproduceerd door fossiele brandstoffen te vergassen en de vrijkomende CO₂ af te

Figuur 4.1

Finaal energiegebruik per energiedrager volgens WLO-scenario Hoog en aanvullende onzekerheidsverkenningen



Bron: PBL/CPB

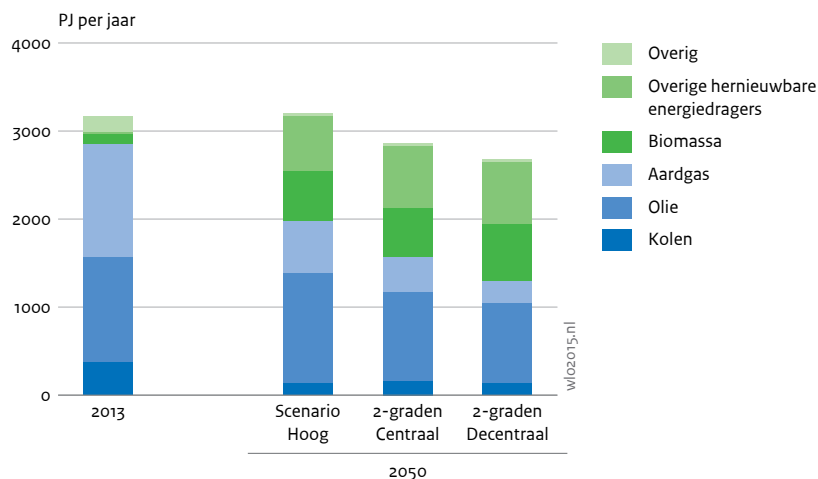
vangen en op te slaan (CCS) en/of door elektrolyse met elektriciteit uit wind en zon. De brandstoffen voor binnenlands en internationaal transport bestaan uit gas en olie die worden geproduceerd uit fossiele brandstoffen en biomassa.

Het binnenlandse finale energiegebruik van alle energiedragers daalt in de twee graden-scenario's van 2.185 petajoule in 2013 tot ongeveer 1.640 petajoule in 2050 in het scenario Centraal en 1.400 petajoule in het scenario Decentraal. Het binnenlandse energiegebruik is exclusief de brandstoffen voor internationaal transport. Het finale verbruik van zowel gas als brandstoffen voor binnenlands transport daalt in de twee graden scenario's aanzienlijk, terwijl het elektriciteitsverbruik sterk stijgt en het warmteverbruik beperkt stijgt ten opzichte van 2013. In de twee graden scenario's is verondersteld dat waterstof een grotere rol gaat spelen; de inzet blijft weliswaar beperkt. Waterstof is een typisch voorbeeld van de onzekerheden die in de toekomstige klimaat- en energiescenario's nog onbekend zijn. Deze energiedrager is in potentie belangrijk maar kan ook helemaal niet worden toegepast.

In het scenario Centraal daalt het finale gasgebruik tot een derde en het finale gebruik van brandstoffen voor binnenlands transport tot 50 procent ten opzichte van het niveau van 2013. In het scenario Decentraal daalt het finale gebruik van gas verder tot een vijfde van het niveau in 2013 en dat van brandstoffen voor binnenlands transport tot 40 procent. Het elektriciteitsgebruik stijgt in beide twee graden scenario's met ongeveer 30 procent. Het gebruik van warmte stijgt met 30 procent in het scenario Centraal en

Figuur 4.2

Primair energiegebruik volgens WLO-scenario Hoog en aanvullende onzekerheidsverkenningen



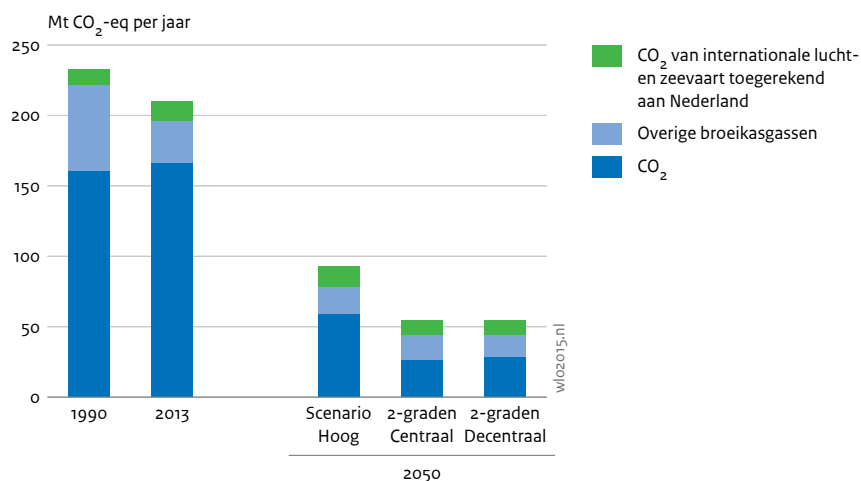
Bron: PBL/CPB

met 10 procent in het scenario Decentraal. De veranderingen van de finale energiedragers worden voornamelijk veroorzaakt door de mate van duurzaamheid van de elektriciteits-, warmte- en gasproductie. De kosten van CO₂-arm finaal elektriciteits- en warmtegebruik, inclusief de emissie van de productie, zijn lager dan bij gas. In het scenario Decentraal is het aandeel hernieuwbare energiebronnen in het finale energiegebruik met 68 procent het grootst, tegen 58 procent in het scenario Centraal.

Primair energiegebruik

Primaire energie is gedefinieerd als energie in de vorm die wordt aangetroffen in de oorspronkelijk gewonnen energiedrager of anders gezegd: bij primaire energie gaat het om energiegrondstoffen in hun natuurlijke vorm, dus vóór enige technische omzetting. In 2013 bestond 90 procent van het totale primaire energiegebruik uit fossiele brandstoffen. De fossiele brandstoffen aardgas, ruwe aardolie en steenkool zijn daarmee voor Nederland de belangrijkste primaire energiedragers. Aardgas wordt direct gebruikt voor warmte, wordt omgezet in elektriciteit en dient als grondstof voor kunstmest. Steenkool wordt eveneens omgezet in elektriciteit en daarnaast gebruikt bij de staalproductie. Ruwe aardolie wordt door raffinaderijen omgezet in diverse olieproducten voor vervoer en in grondstoffen voor de petrochemische industrie (bijvoorbeeld plastics).

Figuur 4.3
Emissie van broeikasgassen volgens WLO-scenario Hoog en aanvullende onzekerheidsverkenningen



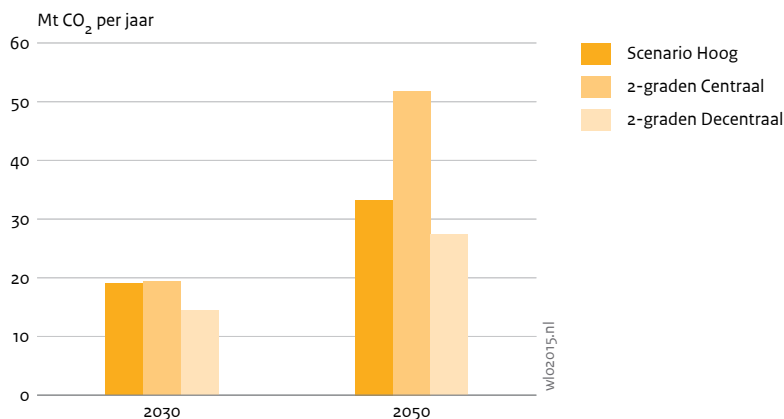
Bron: PBL/CPB

Tegenover fossiele brandstoffen staan de hernieuwbare energiedragers. In de twee-gradenscenario's hebben deze hernieuwbare energiedragers in 2050 de rol van de fossiele brandstoffen voor een deel overgenomen (figuur 4.2). Het deel 'Overig' omvat uranium, netto-import of -export van elektriciteit en energie uit niet-hernieuwbare afvalstromen. 'Overig' is in 2013 een relatief grote categorie door de in dat jaar gereali-seerde netto-import van elektriciteit. In de twee-gradenscenario's is de bijdrage klein.

Het aandeel van 90 procent dat de fossiele energiedragers in 2013 hebben in het totale primaire energiegebruik, komt overeen met ongeveer 2.850 petajoule. In de twee-gradenscenario's neemt de inzet van fossiele energiedragers in 2050 ten opzichte van 2013 met 45 procent sterk af tot circa 1.570 petajoule in het twee-gradenscenario Centraal en met 55 procent tot circa 1.300 petajoule in het scenario Decentraal. De daling vindt vooral plaats bij kolen en gas en deels ook bij olie. De inzet van aardgas is in 2050 afgenomen tot een niveau van ongeveer 20 procent van de huidige inzet. De inzet van aardolie is in 2050 weliswaar afgenomen maar bedraagt nog altijd ongeveer 75 procent van het niveau van 2013. De inzet van hernieuwbare energiebronnen neemt sterk toe en vervangt voor een groot deel de fossiele energieproductie.

Figuur 4.4

Benutting van CO₂-opslag volgens WLO-scenario Hoog en aanvullende onzekerheidsverkenningen



Bron: PBL/CPB

Emissie van broeikasgassen

De binnenlandse emissie van broeikasgassen is in 2050 met 65 procent afgenomen in vergelijking tot 1990 in scenario Hoog en met 80 procent in de twee gradenscenario's. De emissie van CO₂ door de internationale lucht- en zeevaart die is toegerekend aan Nederland, is niet tot nauwelijks afgenomen in zowel het scenario Hoog als de twee gradenscenario's. Bij de twee gradenscenario's is het aandeel van de overige broeikasgassen in 2050 in relatieve zin groot. Deze maken ongeveer een derde uit van de binnenlandse broeikasgasemissies (figuur 4.3).

CCS

In beide twee gradenscenario's vormt CCS een belangrijke technologie om CO₂-emissies te verminderen. De mate waarin CCS wordt toegepast, verschilt tussen beide twee gradenscenario's. De hoeveelheid CCS in het scenario Decentraal is ruwweg de helft van die in het scenario Centraal (figuur 4.4).

Om een specifieke broeikasgasemissiereductie te bereiken is een uitruil mogelijk tussen de inzet van koolstofarme hernieuwbare energie en die van CCS. CCS is vooral ingezet bij het twee gradenscenario Centraal: 52 megaton CO₂ per jaar tegenover 27 megaton per jaar in het scenario Decentraal. In het scenario Decentraal wordt juist meer hernieuwbare energie ingezet: 68 procent tegenover 58 procent in het scenario Centraal. Ruwweg geldt dat er bij elke procentpunt meer hernieuwbare energie die wordt ingezet, 2,5 megaton minder CCS nodig is om het reductiedoel van 80 procent te realiseren.

Een tweegradenscenario zonder de inzet van CCS is alleen mogelijk wanneer het aandeel hernieuwbare of koolstofarme energie ongeveer 80 procent bedraagt en het energiegebruik afneemt met ten minste 25 procent ten opzichte van 2013. Worden belangrijke opties als CCS uitgesloten om de emissie van broeikasgassen tot 80 procent te verminderen, dan nemen de kosten van emissiereductie met ten minste 25 procent toe. Dat komt door de hoge kosten die zijn gemoeid met de extra energiebesparing en met de opslagsystemen voor energie die nodig zijn bij het grote aandeel hernieuwbare energie.

Naar schatting is het nationale potentieel voor ondergrondse opslag (onder land en zee) circa 2.000 megaton CO₂. Dit komt overeen met, bijvoorbeeld, een jaarlijkse opslag van 50 megaton CO₂ gedurende 40 jaar of 25 megaton gedurende 80 jaar. Overigens is dit nationale potentieel niet per se beperkend voor Nederland, omdat de Noordzee nog meer mogelijkheden biedt voor CCS, bijvoorbeeld in de Noorse gasvelden.

Literatuur

- Aalbers, R., V. Kocsis & V. Shestalova (2013), *Innovation Policy for Directing Technical Change in the Power Sector*, CPB Discussion Paper 223.
- Aalbers, R., G. Blanford, J. Bollen & K. Folmer (2015), *Technological Uncertainty in Meeting Europe's Decarbonisation Goals*, CPB Discussion Paper 301.
- Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn & D. Hemous (2012), 'The Environment and Directed Technical Change', *American Economic Review* 102(1): 131-166.
- Bollen, J. & C. Brink (2012), *Air Pollution Policy in Europe: Quantifying the Interaction with Greenhouse Gases and Climate Change Policies*, CPB Discussion Paper 220.
- Born, G.J. van den, J.G. van Minnen, J.G.J. Olivier & J.P.M. Ros (2014), *Integrated analysis of global biomass flows in search of the sustainable potential for bioenergy production*. Den Haag: PBL, <http://www.pbl.nl/en/publicaties/integrated-analysis-of-global-biomass-flows-in-search-of-the-sustainable-potential-for-bioenergy-production>.
- CE Delft (2010), *Handboek Schaduwrijzen: Waardering en weging van emissies en milieu-effecten*, Delft: CE Delft.
- Compendium voor de Leefomgeving (2015), *Feiten en cijfers over milieu, natuur en ruimte*, PBL, CBS & WUR, <http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl/>.
- EC (2009), Directive 2009/28/EC of the European Parliament and Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.
- EEA (2014), *Trends and projections in Europe 2014, Tracking progress towards Europe's climate and energy targets for 2020*, European Environment Agency report No 6/2014, ISSN 1977-8449.
- EIA (2014), *Annual Energy Outlook 2014*, U.S. Energy Information Administration, Office of Integrated and International Energy Analysis, U.S. Department of Energy, Washington, DC 20585.
- Hekkenberg, M. & M. Verdonk (2014), *Nationale Energieverkenning 2014*, Petten: Energieonderzoek Centrum Nederland.
- IEA (2014a), *World Energy Outlook 2014*, International Energy Agency, IEA publications ISBN: 978-92-64-20805-6, www.iea.org/books.
- IEA (2014b), *Energy Technology Perspectives 2014*, IEA publications, www.iea.org/etp/etp2014/.
- IPCC (2015), *Fifth Assessment Reports (AR5)* <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>.
- Kaya, Y. (1990), 'Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: interpretation of proposed scenarios', in *Proceedings of the IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group*, Paris, France.
- KNMI & PBL (2015), *Klimaatverandering. Samenvatting van het vijfde IPCC-assessment en een vertaling naar Nederland*, Den Haag/De Bilt: PBL/KNMI.

- Knopf, B. et al. (2013), 'Beyond 2020 – Strategies and Costs for Transforming the European Energy System', *Climate Change Economics* 4, Supp. 01.
- Matthijsen, J. et al. (2016), *Achtergrondrapport bij WLO-cahier Klimaat en energie*, in voorbereiding.
- PBL & ECN (2012), *Naar een schone economie in 2050: routes verkend. Hoe Nederland klimaatneutraal kan worden*, Den Haag: PBL, <http://www.pbl.nl/publicaties/2011/naar-een-schone-economie-in-2050-routes-verkend>.
- Schoots, K. & P. Hammingh (2015), *Nationale Energieverkenning 2015*, Petten: Energieonderzoek Centrum Nederland.
- Uitvoeringsnota klimaatbeleid (1999), *Deel 1: Binnenlandse maatregelen*, Den Haag: Ministerie van VROM.
- UNEP (2013), *The Emissions Gap Report 2013*, Nairobi: United Nations Environment Programme.
- Vuuren, D. van et al. (2016), 'Energy, Land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm', submitted.
- Vuuren, D. van et al. (2012), 'A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities', *Global Environmental Chang* 22(1): 21-35.

