



Centraal Planbureau
Planbureau voor de Leefomgeving

KLIMAAT EN ENERGIE

ACHTERGRONDDOCUMENT

WLO - Welvaart en Leefomgeving

Toekomstverkenning 2030 en 2050

CPB / PBL

30 maart 2016

PBL

Colofon

Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving

Achtergrondstudie Klimaat en Energie

© CPB Centraal Planbureau en PBL Planbureau voor de Leefomgeving

Den Haag, 2016

PBL-publicatienummer: 1775

Contact

jan.matthijsen@pbl.nl

Auteurs

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

Redactie figuren

Beeldredactie PBL

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. Achtergronddocument Klimaat en energie*, Den Haag: Centraal Planbureau en Planbureau voor de Leefomgeving.

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

Projectleiding WLO

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

Stuurgroep WLO

Directie PBL en CPB

Inhoud

1	Inleiding	5
2	Mondiaal klimaatbeleid en het Nederlandse energiesysteem	6
2.1	Aanpak en methodiek klimaat en energie	7
3	Prijzen van energie en CO ₂	10
3.1	Brandstofprijzen	10
3.1.1	Lage prijzen in WLO Hoog en Hoge prijzen in WLO Laag	10
3.1.2	Brandstofprijzen per eenheid van energie	11
3.1.3	Trendmatige prijsontwikkeling brandstoffen	11
3.1.4	Koppeling tussen olie- en gasprijzen	12
3.2	Elektriciteitsprijzen	12
3.3	CO ₂ -prijzen	14
3.3.1	CO ₂ -prijzen en mondiaal klimaatbeleid	14
3.3.2	CO ₂ -prijzen bij scenario's Laag Hoog	16
3.3.3	CO ₂ -prijzen voor tweegradenscenario's	16
3.3.4	Vergelijking met andere berekende CO ₂ -prijzen	17
3.3.5	Veel gestelde vragen rond CO ₂ -prijzen	18
4	Sectorontwikkeling	21
4.1	Overzicht energievraag- en volumeontwikkeling	22
4.2	Gebouwde omgeving	22
4.2.1	Volume	23
4.2.2	Energie efficiency warmtevraag	23
4.2.3	Warmtevraag en CO ₂ -uitstoot	24
4.2.4	Elektriciteitsvraag	24
4.3	Verkeer en vervoer	25
4.3.1	Wegverkeer en overig transport	25
4.3.2	Internationale lucht- en zeevaart	27
4.4	Industrie	29
4.5	Land- en tuinbouw	29
4.6	Afvalverbranding	30
4.7	Niet-CO ₂ broeikasgassen	30
5	Technologie-ontwikkeling	32
5.1	Mix van energie technologieën	32
5.1.1	Energiemix en onzekerheid	33
5.1.2	Elektriciteitsproductie	34
5.1.3	Warmtevoorziening	35
5.1.4	Brandstoffenproductie	35
5.2	Tweegradenscenario's	36
5.2.1	Sectorontwikkeling tweegradenscenario's	38
6	Literatuur	43

1 Inleiding

In december 2015 is een nieuwe versie van de toekomstverkenning welvaart en leefomgeving (WLO) uitgekomen. 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

Het cahier WLO klimaat en energie (WLO Klimaat en energie, 2015) geeft de motivering vanuit het klimaat en energie perspectief bij de keuze voor de WLO scenario's Laag en Hoog met de bijbehorende verhaallijnen en resultaten voor energie en klimaat. Ook is een aanvullende onzekerheidsverkenning, die spoort met het mondiale tweegradendoel, uitgewerkt. Op een aantal punten in het cahier Klimaat en energie wordt voor nadere verdieping verwezen naar een achtergronddocument. Dit achtergronddocument geeft daar invulling aan. Dit document moet daarom niet als een zelfstandig leesbaar rapport worden gezien, maar als een naslagwerk voor een beperkt aantal onderwerpen met achterliggende gegevens en aannames. Het is een aanvulling op het cahier. Naast dit achtergronddocument zijn de gegevens uit de WLO Klimaat en energie digitaal beschikbaar inclusief meta data (zie ook <http://www.wlo2015.nl/rapporten-wlo/klimaat-en-energie> onder "Downloads").

Leeswijzer. Hoofdstuk 2 behandelt de aanpak en methodiek waarmee het mondiale klimaat in de WLO is verbonden met ontwikkelingen van het Nederlandse energiesysteem. Hoofdstuk 3 geeft nadere uitleg bij: a) de prijzen van de fossiele brandstoffen en biomassa, b) de groothandelsprijzen van elektriciteit en c) de CO₂-prijzen in de verschillende scenario's inclusief de tweegraden scenario's. In hoofdstuk 4 zijn de finale energievraag en volume ontwikkelingen in 2030 en 2050 nader uitgewerkt voor de verschillende sectoren voor de WLO scenario's Laag en Hoog. Hoofdstuk 5 behandelt op hoofdlijnen de ontwikkeling van de toegepaste energieaanbod technologieën en de daaraan gepaarde onzekerheden. De tweegradenscenario's die als aanvullende onzekerheidsverkenning op het WLO scenario Hoog zijn gemaakt zijn in dit hoofdstuk uitgewerkt voor wat betreft de finale energievraag per sector.

2 Mondiaal klimaatbeleid en het Nederlandse energiesysteem

Dit hoofdstuk beschrijft de aanpak en methodiek hoe het mondiale klimaatbeleid in de WLO module klimaat en energie is gekoppeld aan de ontwikkelingen van het Nederlandse energiesysteem tussen 2013 en 2050.

Het klimaat en energiegebruik zijn sterk gekoppeld omdat op dit moment het overgrote deel van de energieproductie tot de uitstoot van CO₂ en andere broeikasgassen leidt als gevolg van het gebruik van fossiele brandstoffen. In 2013 was bijvoorbeeld nog ongeveer 75 procent van de finaal energiegebruik in Europa van fossiele oorsprong, in Nederland zelfs meer dan 90 procent. Toenemend energiegebruik als gevolg van economische ontwikkeling leidt tot een toename van de klimaatverandering en andere negatieve gevolgen zoals verdere stijging van de zeespiegel en verzuring van de oceanen. De inschatting van de wereldwijde gevolgen van broeikasgastoeename 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). Klimaatbeleid richt zich onder andere op het inperken van de uitstoot van broeikasgassen door het energiesysteem.

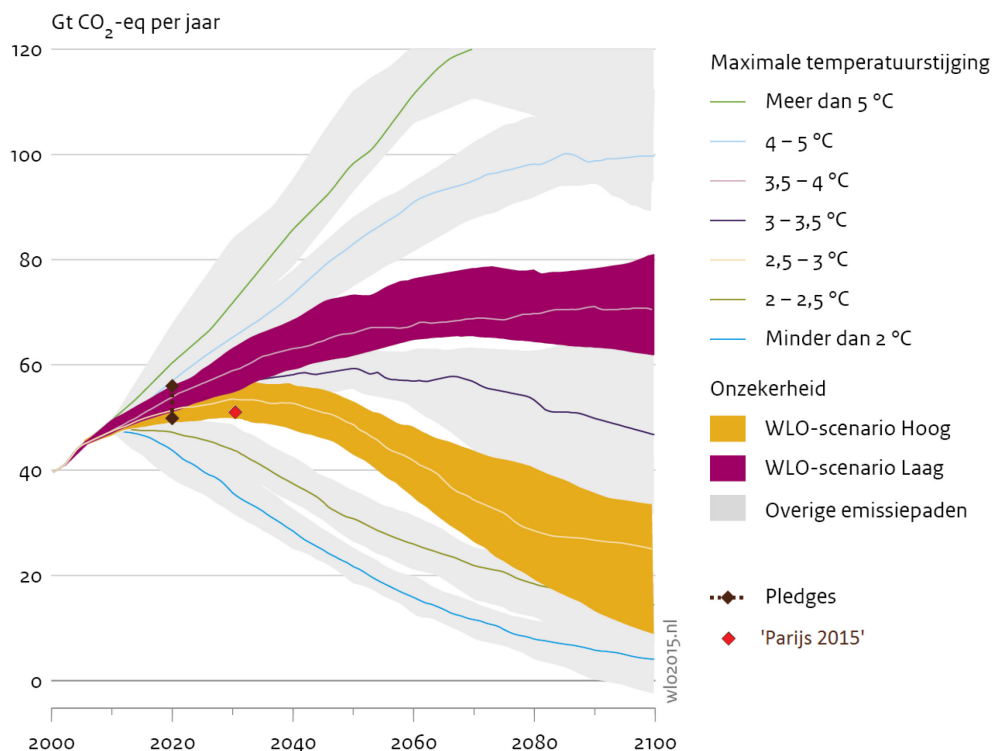
Om de opwarming van de aarde te beperken tot “well below two degrees” zoals met het recente klimaatakkoord (Parijs, december 2015) is besloten, zal er wereldwijd een afname van van de uitstoot van broeikasgassen moeten plaatsvinden zodat uitstoot en opname nog in de 21^e eeuw in evenwicht komen. Voor Europa en Nederland vraagt dit om een broeikasgasvermindering tot 2050 die daadwerkelijk invulling geeft aan het Europese streven van 80-95 procent reductie ten opzichte van 1990, met een tussenstap voor 2030 die mogelijk verder gaat dan de al afgesproken reductie inspanning van 40 procent. Hoewel het Parijs-klimaatakkoord een hoger ambitieniveau heeft en qua procesaanpak om tot verdergaande reducties te komen verder gaat dan eerdere klimaatakkoorden zijn de beloftes die landen hebben gedaan om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen vergelijkbaar met de veronderstellingen in Laag en Hoog.

Het uitgangspunt bij de scenario's Laag en Hoog zijn de toezeggingen, Pledges in figuur 2.1, die landen tijdens de VN-klimaatonderhandelingen hebben gedaan om broeikasgasemissies te verminderen. 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. In figuur 2.1 zijn ook de voorwaardelijke toezeggingen van landen voor 2030 uit het Parijs klimaatakkoord aangegeven, Parijs '2015'. Die uitstoot is volledig in lijn met WLO Hoog. De

WLO scenario's zijn daarmee onveranderd van kracht als scenario's die op vaststaand klimaatbeleid zijn gestoeld.

Figuur 2.1

Waarschijnlijke mondiale temperatuurstijging gerelateerd aan emissie broeikasgassen



Bron: UNEP Gap Report 2013

2.1 Aanpak en methodiek klimaat en energie

Het uitgangspunt van de WLO is 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. De mate waarin internationaal klimaatbeleid wordt gevoerd is daarmee de dominante onzekerheid voor de ontwikkeling van het Nederlandse energiesysteem.

Zonder mondiaal klimaatbeleid zal de emissie van broeikasgassen blijven stijgen en zal het aandeel van CO₂-arme energietechnologie beperkt blijven; met klimaatbeleid zal de emissie van broeikasgassen dalen en kan CO₂-arme technologie een substantiële tot dominante vorm van energieopwekking worden.

Het effect van energiebesparing op de uitstoot van broeikasgassen is ook afhankelijk van het mondiale klimaatbeleid. Want autonome energiebesparingen in een wereld zonder klimaatbeleid dus alleen vanuit het oogpunt van kostenreductie leiden misschien wel tot een vermindering van het energiegebruik maar niet per se tot een vermindering van de CO₂-uitstoot. Bijvoorbeeld: zonder klimaatbeleid ligt een overgang van gas naar kolen voor de hand bij

een lage kolenprijs. En omdat kolen ongeveer een tweemaal hogere uitstoot per eenheid van energie heeft dan gas, leidt dit juist tot een hogere CO₂-uitstoot.

In Tabel 2.1 worden de opeenvolgende stappen gegeven die kort de aanpak en methodiek schetsen hoe het internationaal klimaatbeleid gekoppeld wordt aan ontwikkelingen van het Nederlandse energiesysteem. Het internationale klimaatbeleid is niet met beleidsinstrumenten uitgewerkt, maar er is impliciet beleid verondersteld dat tot een bepaald mondiaal reductiepad zal leiden met een daarbij behorende opwarming van de aarde als na de 21^e eeuw. In beide WLO scenario's zowel Laag als Hoog intensiveert het klimaatbeleid. Het tempo waarin en de ambitie waarmee dit gebeurt, verschillen echter duidelijk per scenario.

Tabel 2.1 Stappenschema hoe in de WLO het mondiale klimaatbeleid is gekoppeld aan de ontwikkelingen van het Nederlands energiesysteem.

1	Bepaling plausibele mondiale uitstootpaden van broeikasgassen voor WLO scenario's Laag en Hoog. Uitgangspunt zijn de 2020-pledges uit UNEP (2013). Uitstootreducties conform de 'unconditional pledges' in Laag en inclusief de 'conditional pledges' in Hoog. (WLO Klimaat en energie 2015).
2	Koppeling mondiale uitstoot in Laag en Hoog aan een specifieke lange termijn klimaatverandering. Als gevolg van de mondiale uitstoot van broeikasgassen in scenario Laag, bij een lage economische groei, zal de wereldgemiddelde temperatuur na de 21 ^e eeuw zijn gestegen met 3,5 tot 4 graden en in scenario Hoog, bij een hoge economische groei, met 2,5 tot 3 graden.
3	Vaststelling van prijzen voor fossiele brandstoffen, biomassa en CO ₂ volgens verhaallijnen in Laag en Hoog. Fossiele brandstofprijzen zijn relatief hoog in Laag en laag in Hoog. De prijzen voor biomassa en CO ₂ zijn daarentegen laag in Laag en hoog in Hoog (zie hoofdstuk 3). Prijzen zijn invoergegevens voor andere WLO modules zoals Landbouw en Mobiliteit.
4	Vaststelling van internationale beelden die passen bij WLO Laag en Hoog conform onderzoek van de OESO (O'Neill et al. 2014). Hierin zijn vijf mogelijke ontwikkelpaden – de zogenaamde Shared Socio-economic Pathways (SSP's) – geschetst voor de periode 2015 – 2100. Deze SSP's beschrijven per periode van 5 jaar het volume van een aantal kernvariabelen voor 185 landen en regio's (IIASA 2011). Samen omvatten deze gebieden de hele wereld. (zie ook achtergronddocument bij WLO Macro-economie, 2015).
5	Berekening met TIMER/FAIR model geeft de Europese bijdrage aan reductie van broeikasgassen in 2050 (tabel 2.2) voor Laag en Hoog op basis van kosten-optimale maatregelen om de mondiale uitstoot van broeikasgassen te verminderen. Randvoorwaarden bij de modelberekeningen voor Laag en Hoog zijn klimaatverandering (stap 2), prijzen (stap 3) en mondiale scenariogegevens (stap 4).
6	Toepassing van Europees reductiepercentage broeikasgassen op Nederland. Het uitgangspunt hierbij is dat van Nederland geen grotere inspanning wordt verwacht dan Europees gemiddeld om broeikasgassen te verminderen, maar ook geen kleinere.
7	Vaststelling broeikasgas reductiedoel voor 2030: 40 procent in Laag en Hoog, conform besluit van de Europese raad. In de verhaallijn in Laag wordt dit doel bijgesteld tot 30 procent tussen 2020 en 2030 overeenkomstig de verhaallijn van Laag waarin de internationale vorderingen rond het klimaatbeleid gaan haperen.
8	Vaststelling van de volumeontwikkeling en energievraag per sector op basis van sector ontwikkelingen aan de hand van gegevens uit andere WLO modules (zie hoofdstuk 4).

9	Berekening met het E-designmodel ¹ (PBL & ECN 2012) waarmee de energievraag en -aanbod in evenwicht zijn gebracht met technologieën die het vooropgesteld reductiedoel van broeikasgassen (Tabel 2.2) realiseren.
---	--

Voor de aanvullende onzekerheidsverkenning op het WLO scenario Hoog, de tweegradenscenario's (zie sectie 5.2), waarin de mondiale opwarming op de lange termijn wordt beperkt tot twee graden geldt feitelijk hetzelfde stappenplan. Het broeikasgas reductiedoel voor Nederland is in dat geval 80 procent verondersteld. Berekeningen voor West Europa (zie onder) komen voor het tweegradendoel uit op 80 procent maar is afhankelijk van de SSP condities. Dat 80 procent doel komt overeen met het minimum van het Europese streven van 80-95 procent reductie in 2050 ten opzichte van 1990. Het beperken van de mondiale opwarming op de lange termijn vergt een mondiale inspanning. Bij diepe broeikasgasreducties zoals die voor twee graden is het erg onzeker welke reductieopgave dan precies bij Nederland hoort. Een nationaal doel van 80 procent in 2050 past in ieder geval in een scenario waarin de mondiale opwarming wordt beperkt tot twee graden.

Om de reductiedoelen (tabel 2.2) vast te stellen voor Nederland zijn berekeningen gedaan met het TIMER/FAIR model instrumentarium. Dat is een combinatie van het regionaal energiemodel TIMER (MNP 2001) met het beleidsbeslismodel FAIR. Met FAIR wordt onderzocht en verkent welke regio in de wereld wat kan doen om een bepaald broeikasgasdoel te halen (Den Elzen & Lucas 2005; MNP 2007). TIMER en FAIR maken onderdeel uit van het IMAGE framework model voor verkenningen van de mondiale leefomgeving (IMAGE website). De berekeningen voor 2050 zijn uitgevoerd op een vergelijkbare wijze als de resultaten voor de SSP scenario's zoals beschreven in Van Vuuren et al. (2016).

Scenariogegevens voor de TIMER/FAIR berekeningen voor WLO Laag zijn die van het SSP3 wereldscenario en voor WLO Hoog die van het SSP1 wereldscenario (zie stap 4 hierboven). Daarnaast zijn de WLO brandstofprijzen opgelegd voor de regio West Europa in de berekeningen voor Laag en Hoog (zie stap 3 hierboven). Tot slot is een mondiale forcering (opwarming) meegegeven als einddoel; 3.5-4 graden in Laag en 2.5-3 graden in Hoog en 2 graden voor de aanvullende onzekerheidsverkenning. De 2050 reductiepercentages die resulteerden voor de regio West-Europa zijn verondersteld ook van toepassing te zijn voor Nederland. De percentages uit tabel 2.2 zijn de op vijftallen afgeronde berekende getallen. De reductiedoelen voor 2030 zijn conform de huidige Europese afspraken en de verhaallijnen zoals die zijn beschreven in het cahier WLO Klimaat en energie. Bij de aanvullende onzekerheidsverkenning op Hoog, de tweegradenscenario's, wordt verondersteld dat als gevolg van de hogere klimaatambitie ten opzichte van WLO Hoog ook een grotere reductie wordt bereikt in 2030 van 45 procent ten opzichte van 1990.

Tabel 2.2: Reductiedoelen in de WLO scenario's voor de uitstoot van broeikasgassen in Nederland ten opzichte van die in 1990 (in procenten).

	2030	2050
Scenario Laag	30	45
Scenario Hoog	40	65
Tweegradenscenario	45	80

¹ Het E-designmodel is specifiek voor Nederland ontwikkeld om routes naar een koolstofarme economie te verkennen bij het Europese streven van 80-95 procent broeikasgasreductie ten opzichte van 1990.

3 Prijzen van energie en CO₂

Het cahier WLO Klimaat en energie behandelt de prijzen voor de WLO scenario's van fossiele brandstoffen, biomassa en CO₂ in de context van de WLO verhaallijnen en de onzekerheden rond klimaat en energie. Alle prijzen zijn gegeven in dollars en/of euro's met het prijspeil 2013 tenzij dit anders wordt vermeld. Dit hoofdstuk geeft op een aantal punten extra toelichting bij keuzes die een rol hebben gespeeld bij het vaststellen van de fossiele brandstofprijzen, biomassaprijzen en de CO₂-prijzen. Daarnaast zijn de groothandelsprijzen voor elektriciteit beschreven voor de WLO scenario's.

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 stringentere 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.

3.1 Brandstofprijzen

De meeste aannames en achtergronden bij de brandstofprijzen zijn uitgewerkt in het cahier Klimaat en energie. Hieronder wordt op een drietal onderwerpen rond de gehanteerde brandstofprijzen extra informatie gegeven. De olieprijzen in scenario Laag zijn gebaseerd op de World Energy Outlook (IEA 2014a), en de olieprijzen in scenario Hoog op de International Energy Outlook (EIA 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 olieprijzen na 2040 zijn geëxtrapolleerd op basis van Energy Technology Perspectives (IEA 2014b) in scenario Laag en trendmatig doorgetrokken in scenario Hoog.

3.1.1 Lage prijzen in WLO Hoog en Hoge prijzen in WLO Laag

In scenario Hoog nemen we aan dat geopolitieke spanningen een geringe rol spelen 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 3.1). Dat de brandstofprijzen in scenario Hoog lager zijn dan in scenario Laag lijkt contra-intuïtief: hoge economische groei zou juist tot een grotere vraag naar fossiele brandstoffen moeten leiden 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. Andere

economische en energiemodelstudies die geen rekening houden met geopolitieke belemmeringen bevestigen deze prijsontwikkeling (Aalbers et al. 2015; Van Vuuren 2012).

3.1.2 Brandstofprijzen per eenheid van energie

Tabel 3.1 geeft de prijzen in de gebruikelijke eenheden afgerond op hele getallen, zoals in het cahier Klimaat en energie. In tabel 3.2 zijn diezelfde prijzen geconverteerd naar gelijke eenheden van euro per gigajoule. Deze wijze van presentatie brengt de kosten per eenheid van energie voor de verschillende brandstoffen beter in beeld.

Tabel 3.1 Brandstofprijzen in de scenario's Laag en Hoog (gebruikelijke eenheden)

(Brandstof)prijzen		2013	2030	2050	2013	2030	2050
			Laag	Laag		Hoog	Hoog
Olie ¹⁾	dollar per vat	109	135	160	109	65	80
Gas ²⁾	dollar per Mbtu	12	12	15	12	6	7
Kolen ³⁾	dollar per ton	105	115	130	105	85	85
Biomassa	dollar per GJ	4	7	14	4	8	28

¹⁾ Europe Spot Price Brent Crude Oil

²⁾ Mbtu = mega British thermal unit (1 Mbtu ≈ 1 GJ)

³⁾ Ketelkolen invoerprijs per gewicht uit niet EU-landen (CBS)

Tabel 3.2 Brandstofprijzen in de scenario's Laag en Hoog (gelijke eenheden)

(Brandstof)prijzen		2013	2030	2050	2013	2030	2050
			Laag	Laag		Hoog	Hoog
Olie	euro per gigajoule	13.4	16.6	19.7	13.4	8.0	9.8
Gas	euro per gigajoule	8.4	8.6	10.4	8.4	4.6	5.2
Kolen	euro per gigajoule	3.2	3.5	3.9	3.2	2.6	2.6
Biomassa	euro per gigajoule	3.0	5.6	10.2	3.0	6.0	21.0

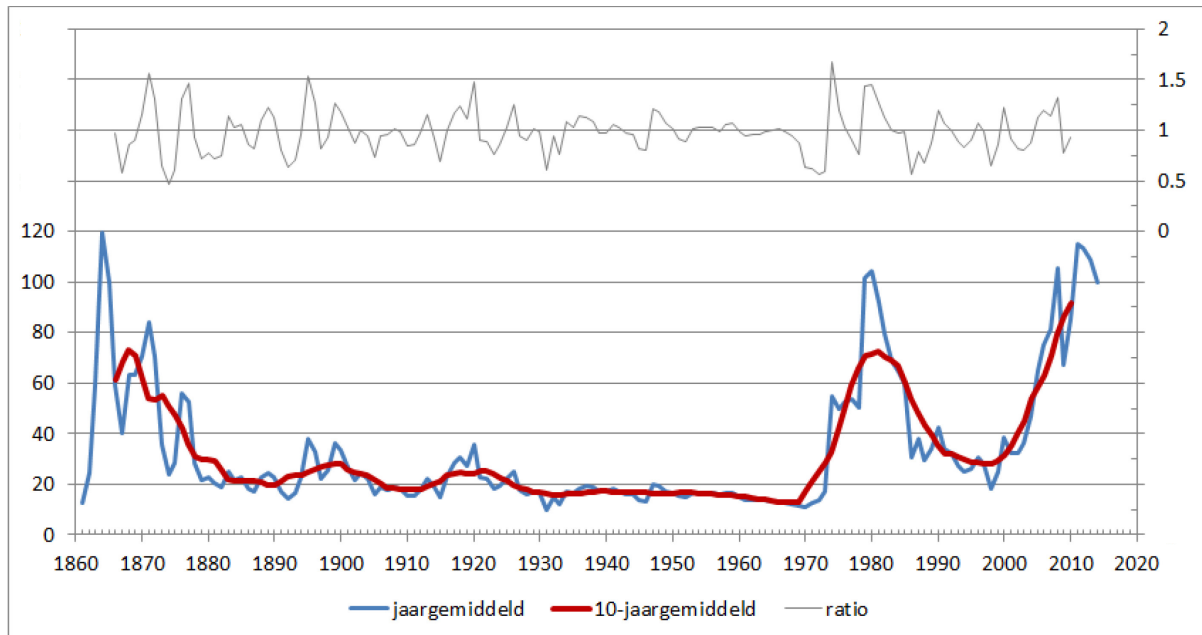
3.1.3 Trendmatige prijsontwikkeling brandstoffen

Met betrekking tot de brandstofprijzen kijken we in de 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 Brentolie, die wel 50 procent kunnen afwijken van de tienjaargemiddelde WLO-prijzen.

Figuur 3.1 illustreert het verschil tussen trendmatige ontwikkelingen en de pieken van jaartot-jaar op basis van de historische reeks van de olieprijs vanaf 1861 tot 2014 (BP 2014). De trendmatige ontwikkeling, hier in beeld gebracht met de voortschrijdende tienjaargemiddelde olieprijs verschilt van de variatie in de olieprijsen van jaar-tot-jaar. De voortschrijdende tienjaargemiddelde olieprijs is berekend van t-5 jaar tot t+5 jaar (voor elk jaar t).

Een hoge dan wel lage olieprijs in de WLO scenario's is daarmee wat anders dan de boven- en onderkant van de olieprijs die in de nationale energieverkenningen is gebruikt en eerder in de referentieramingen. Die marge van ±42 procent die in de Nationale energieverkenningen wordt gehanteerd geeft namelijk de bandbreedte waarbinnen de olieprijs zou kunnen variëren van jaar tot jaar.

Figuur 3.1 Onder de jaargemiddelde en de voortschrijdend tienjaargemiddelde olieprijs in dollar per vat. Boven de verhouding tussen de jaargemiddelde en de tienjaargemiddelde olieprijs (rechteras).



3.1.4 Koppeling tussen olie- en gasprijzen

De gasprijzen in WLO scenario's Laag en Hoog voor 2030 en 2050 zijn gekoppeld aan de olieprijs. Zolang olie en gas nog gebruikt (kunnen) worden voor dezelfde toepassingen, zullen hun prijzen gekoppeld zijn. De mate waarin zal van jaar tot jaar verschillen. Bovendien zien we dat gas en olieprijs niet direct op elkaar reageren. Vaak zitten er enkele maanden reactietijd tussen (typisch 6-9 maanden). Het een en ander blijkt uit Brigida (2014) en Franza (2014). Hiermee vinden we brede ondersteuning voor de WLO benadering om olie- en gasprijzen in ieder geval voor tienjaargemiddelde prijzen met een constante factor te koppelen conform de cijfers voor de Europese gas- en olieprijs in IEA (2014a) en IEA (2014b). De ratio volgens IEA tussen de Europese gasprijs (in dollar per Mbtu) en de olieprijs (in dollar per vat) is ongeveer 0.1. Op de lange termijn richting 2050 verschuift de ratio voor de Europese prijzen naar 0.09. De projecties door het Engelse Department of Energy and Climate Change voor fossiele brandstofprijzen (DECC 2013) hanteren een zeer vergelijkbare ratio van 0.11. Het EIA (2014) verwacht ook de komende decennia een min of meer constante koppeling tussen gas- en olieprijs.

3.2 Elektriciteitsprijzen

Tabel 3.3 geeft deze elektriciteitsprijzen weer voor zowel de scenario's Laag en Hoog als het tweegradenscenario (zie sectie 5.2). De prijzen in deze tabel zijn groothandelsprijzen, zoals die bijvoorbeeld worden aangetroffen op de APX. Zij zijn exclusief de energiebelastingen en heffingen die door eindgebruikers worden betaald. De invloed van (productie)subsidies en feed-in tarieven voor duurzame energie is echter wel meegenomen. Deze leiden immers tot een uitbreiding van de productiecapaciteit in Nederland of het ons omringende buitenland, waardoor de marktprijs van elektriciteit in Nederland daalt.

In Laag zijn de elektriciteitsprijzen in 2030 vastgesteld conform de inzichten uit de nationale Energieverkenning 2015 (vastgesteld beleid). Richting 2050 stijgen de prijzen in Laag, omdat de subsidieregelingen voor duurzame energie deels worden afgebouwd en de CO₂-prijs

stijgt. In Hoog liggen de elektriciteitsprijzen in 2030, vanwege het strengere klimaatbeleid, de snellere afbouw van subsidieregelingen en het strengere luchtbeleid, beduidend hoger dan in Laag. In Hoog stijgen de elektriciteitsprijzen als gevolg van het strenge klimaatbeleid en de volledige afbouw van subsidieregelingen uiteindelijk naar 100 euro per MWh in 2050. In het tweegradenscenario liggen de elektriciteitsprijzen in 2030 beduidend hoger dan in Hoog. In het tweegradenscenario zijn er namelijk geen productiesubsidies en feed-in-tarieven voor duurzame energie, maar is de relatief hoge CO₂-prijs de drijvende kracht achter de decarbonisering van de elektriciteitssector.

Met betrekking tot de elektriciteitsprijzen in tabel 3.3 moet worden opgemerkt dat de gasprijzen uit de WLO-scenario's slechts een beperkt effect hebben op de elektriciteitsprijzen. Daarvoor zijn een aantal redenen aan te wijzen. De eerste is dat de toekomstige elektriciteitsprijzen tot stand zullen komen op een Europese, in plaats van de Nederlandse, markt. Nu al is de invloed van productiecapaciteit op de elektriciteitsprijs in de ons omringende landen merkbaar. In de toekomst zal deze invloed als gevolg van de toegenomen interconnectie alleen maar toenemen. De consequentie hiervan is dat niet langer het aandeel gas in Nederland relevant is voor de prijsvorming, maar het aandeel gas in Europa. Omdat het aandeel gas in Europa veel lager is dan het aandeel gas in Nederland zullen gasgestookte centrales in veel minder uren de elektriciteitsprijs zetten.²

De tweede reden is dat de combinatie van een hoge gasprijs en een lage CO₂-prijs in scenario Laag ertoe leidt dat er op Europees niveau vrijwel geen gas meer gebruikt wordt voor de productie van elektriciteit. Tezamen vormen deze redenen de verklaring voor het feit dat de elektriciteitsprijs in scenario Laag lager is dan in scenario Hoog ondanks het feit dat de gasprijs hoger is.

Voor de korte termijn (zeg tot 2030) komt daar in scenario Laag bij dat de stimulering van duurzame energie via productiesubsidies en feed-in-tarieven de elektriciteitsprijzen onder druk zet. De reden is dat deze stimuleringsmaatregelen leiden tot overcapaciteit, met als gevolg dat de prijzen onder druk komen te staan.

Tabel 3.3: Groothandelsprijzen elektriciteit (in euro per MWh)

	2013	2030	2050
Scenario Laag	52	67	90
Scenario Hoog	52	90	100
Tweegradenscenario	52	115	105

Uitgangspunt voor de bovenstaande elektriciteitsprijzen zijn de elektriciteitsprijzen in tabel 3.4. Deze elektriciteitsprijzen zijn bepaald met het algemeen evenwichtsmodel MERGE (Aalbers et al. 2015) en moeten geïnterpreteerd worden als groothandelsprijzen op een markt waar investeringen in en gebruik van centrales gedreven door prijzen, waaronder de energie- en CO₂-prijzen. Op zo'n markt is geen plaats en noodzaak voor subsidies, zoals de SDE+. In tabel 3.4 valt op dat de elektriciteitsprijzen blijkbaar maar beperkt verschillen tussen de drie scenario's (maximaal 16 euro per MWh ~ 2 ct/kWh). Dat komt omdat de elektriciteitssector in alle drie de scenario's vrijwel volledig gedecarboniseerd is. Een belangrijke variabele als de CO₂-prijs heeft daardoor vrijwel geen effect meer op de elektriciteitsprijzen.

Vergelijken we tabel 3.4 met tabel 3.3 dan zien we dat de elektriciteitsprijzen in het tweegradenscenario overeenkomen met de prijzen zoals die door MERGE zijn berekend.³ Dit volgt

² In 2013 was het aandeel gas in Nederland 50%. In Europa was dat 15,5%.

³ De range van prijzen in tabel 3.4 voor het tweegradenscenario geeft de elektriciteitsprijzen voor een emissie-reductie van 80 procent en 95 procent weer. Deze range is zodanig klein dat deze niet is opgenomen in de tweegradenscenario's.

uit het verhaal achter de tweegradenscenario's: de prikkel tot decarbonisatie komt daar volledig van de CO₂-prijzen en niet van productiesubsidies of feed-in tarieven. De elektriciteitsprijzen in de tweegradenscenario's geven daarmee een getrouw beeld van de kosten van de elektriciteitsproductie.

Tabel 3.4: Groothandelsprijzen van elektriciteit (in euro per MWh) op een perfect werkende markt (bron: MERGE berekeningen)

	2030	2050
Scenario Laag	110	88
Scenario Hoog	115	101
Tweegradenscenario	113-116	102-104

In scenario Laag (tot na 2040) en in scenario Hoog (tot na 2030) worden nog wel productiesubsidies verstrekt. De groothandelsprijzen in de WLO-scenario's (tabel 3.3) liggen dan ook onder de groothandelsprijzen zoals die berekend zijn met het MERGE model. Productiesubsidies en feed-in tarieven leiden immers tot lagere marktprijzen.

In Laag zijn deze productiesubsidies/feed-in tarieven hoger dan in Hoog. De groothandelsprijzen van elektriciteit in de WLO-scenario's uit tabel 3.3 wijken om die reden in scenario Laag meer af van de door MERGE bepaalde groothandelsprijzen voor elektriciteit uit tabel 3.4.

Omdat het klimaatbeleid minder stringent is in Laag dan in Hoog, zijn de elektriciteitsprijzen in 2050 in Laag lager dan in Hoog. Er worden in Laag relatief goedkopere technologieën ingezet dan in Hoog.

3.3 CO₂-prijzen

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. Dat heeft zijn weerslag op de hoogte van de CO₂-prijs.

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-prijs 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.

3.3.1 CO₂-prijzen en mondiaal klimaatbeleid

Voor de WLO-scenario's zijn de CO₂-prijzen voor 2050 bepaald op basis van de preventiekostenmethode (CE Delft 2010) met behulp van het TIMER/FAIR model (Van Vuuren et al. 2015) en het MERGE model (Aalbers et al. 2015). Beide modellen berekenen uitgaande van temperatuur of CO₂-doelstellingen de bijbehorende CO₂-prijzen op mondiale schaal. De berekende CO₂-prijzen mogen daarmee geïnterpreteerd worden als de minimale kosten van maatregelen die nodig zijn om de opgelegde CO₂-reductie of temperatuur doelstelling te ha-

len. Het zijn minimale maatschappelijke kosten, omdat de CO₂-prijzen zijn bepaald op basis van de meest kosteneffectieve maatregelen. Het kan natuurlijk zijn dat de samenleving bepaalde maatregelen niet wil of om andere redenen een voorkeur heeft voor andere maatregelen die duurder zijn. De WLO CO₂-prijzen voor 2030 zijn consistent met de bandbreedte van de CO₂-prijzen in 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 3.5 geeft van deze uitgangspunten een overzicht.

Tabel 3.5 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 procent	40 procent
Emissiereductie NL in 2050	45 procent	65 procent
Klimaatbeleid	<ul style="list-style-type: none"> • EU stelt haar 2030-doel rond 2025 bij van -40 procent naar -30 procent • Het Europese emissiehandelsstelsel 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

Als uitgangspunt voor de WLO scenario's is gekozen voor de Europese emissiedoelstelling van 45 procent in Laag en 65 procent in Hoog en een reductie percentage van 80 procent voor de tweegradenscenario's. Deze reductiepercentages zijn vervolgens ook als uitgangspunt genomen voor de CO₂-prijzen in de WLO voor Nederland. Om de bijbehorende CO₂-prijzen te bepalen zijn TIMER/FAIR en MERGE vervolgens opnieuw gedraaid met als randvoorwaarde een mondiale gemiddelde opwarming na 2100 zoals beschreven in hoofdstuk 2: in scenario Laag 3,5 tot 4 graden Celsius, in scenario Hoog 2,5 tot 3 graden Celsius en in het tweegradenscenario 2 graden Celsius. Deze temperatuurranges horen bij de mondiale emissiepaden van broeikasgassen voor Laag en Hoog zoals beschreven in hoofdstuk 2 (zie ook figuur 2.1)

Tabel 3.6 geeft het overzicht van de berekende CO₂-prijzen. De CO₂-prijzen voor 2030 zijn in lijn met de CO₂-prijzen zoals die in de NEV worden 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 gaat tot 2030. Hierna kijken we daarom alleen naar de motivatie bij de CO₂-prijzen in 2050. Er zijn prijzen berekend met het TIMER/FAIR model voor de aanvullende onzekerheidsverkenning, tweegraden, zijn een factor drie groter dan die van het MERGE model. Hoe dieper de reductie des te groter kunnen verschillen tussen modellen worden als gevolg van toenemende onzekerheid rond technologiekosten (zie ook sectie 3.3.3. en figuur 3.2).

Tabel 3.6 Berekende WLO CO₂-prijzen voor 2050 volgens TIMER/FAIR en MERGE (euro per ton CO₂)

	CO ₂ -reductie	TIMER/FAIR	MERGE
Laag	45 procent	29	43
Hoog	65 procent	131	179
tweegraden	80 procent	612	196
	≥ 95 procent		507-888

3.3.2 CO₂-prijzen bij scenario's Laag Hoog

In beide scenario's intensificeert 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. 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.

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 2030 en 40 euro per ton in 2050 (tabel 3.7). De kosten van CO₂-emissiereductie in de sectoren die buiten het emissiehandelssysteem vallen, zoals de gebouwde omgeving en transport, liggen aanzienlijk hoger.

Tabel 3.7 CO₂-prijzen in de scenario's Laag en Hoog (euro per ton CO₂)

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

*EU-ETS-prijzen

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-prijs. De CO₂-prijs stijgt uiteindelijk naar 160 euro per ton in 2050.

3.3.3 CO₂-prijzen voor tweegradenscenario's

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 wel 95 procent, maar het is onzeker welke reductie precies nodig zal zijn.

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. Ook kunnen Nederland en Europa uiteraard financieel bijdragen aan reducties elders.

Voor de tweegradenscenario's in de WLO geven we daarom een brede bandbreedte van CO₂-prijzen (tabel 3.8). Deze bandbreedte is gebaseerd op berekeningen met het MERGE-model voor 2050 met emissiereducties van 80 procent en meer dan 95 procent voor de Europese Unie als geheel.

De CO₂-prijzen lopen uiteen van 100-500 euro 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 uitstoot in 2050 met 95 procent en meer moet zijn afgenomen.

Tabel 3.8 Onder- en bovenwaarden voor de CO₂-prijs in een tweegradenscenario (euro per ton CO₂)

	2013	2030	2050
Tweegradenscenario	4	100-500	200-1.000

Voor het tweegradendoel is het echter nodig het klimaatbeleid zo snel mogelijk aan te scherpen. Dat uit zich in de CO₂-prijs voor 2016 in het tweegradenscenario. Die zou namelijk al ongeveer 60 euro per ton CO₂ moeten zijn in 2016; terugrekenend van 100 euro per ton CO₂ in 2030 (tabel 3.8) met een jaarlijkse prijsstijging van 3.5 procent. Het uitgangspunt bij een tweegradenscenario ligt daarmee veel hoger dan de werkelijke prijs in 2016 die rond de 5 euro per ton CO₂ ligt.

Bij een reductiedoelstelling van 80 procent 2050 en een CO₂-prijs van 200 euro per ton CO₂ wordt in het model relatief zwaar geleund op technische maatregelen om de reductiedoelstelling te halen. 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. Daardoor zal bij maatregelen die nodig zijn om 95 procent reductiedoelstelling te halen in de WLO scenario's de negatieve welvaartseffecten van het klimaatbeleid sterk toenemen. In de WLO scenario's is aangenomen dat de preferenties van mensen niet veranderen. Verandering van gedrag moet daarom tot stand komen via beleidsmaatregelen, zoals het beprijsen van CO₂. Het is denkbaar dat in werkelijkheid een deel van deze gedragsveranderingen eerder en zonder maatregelen zullen plaatsvinden. Als preferenties inderdaad zelf vergroenen, dan zal dat resulteren in lagere CO₂-prijzen.

3.3.4 Vergelijking met andere berekende CO₂-prijzen

Om de verschillen tussen de CO₂-prijzen in de WLO in een bredere context te plaatsen vergelijken we de prijzen uit tabel 3.7 en tabel 3.8 met de prijzen van het Energy Modelling Forum (EMF28) zoals beschreven door Knopf et al. (2013).

De vergelijking met de EMF28 scenario's is op basis van Figuur 3.2. Hierin worden de CO₂-prijzen weergegeven van de 40- en 80 procent reductiescenario's uit de EMF28 voor de 11 deelnemende modelteams, waaronder een eerdere versie van het MERGE model. Deze scenario's worden gebruikt door de Europese Commissie. De mediane CO₂-prijs in het 40 procent reductiescenario is 64 euro per ton CO₂ in 2050 (25-75 procent kwartielen: 48-83 euro per ton CO₂). De mediane CO₂-prijs in 2050 in het 80 procent scenario is 521 euro per ton (25-75 procent kwartielen: 240-1127 euro per ton CO₂). De WLO CO₂-prijzen passen bij deze brede modelranges. De cijfers van zowel het MERGE model als het TIMER/FAIR model zijn geen extremen in deze reeksen.

Figuur 3.2 CO₂-prijzen in euro per ton CO₂ (prijspeil 2010) voor de EU bij een reductie ten opzichte van 1990 van 40 procent "40%DEF" (links) en 80 procent "80%DEF" (rechts).

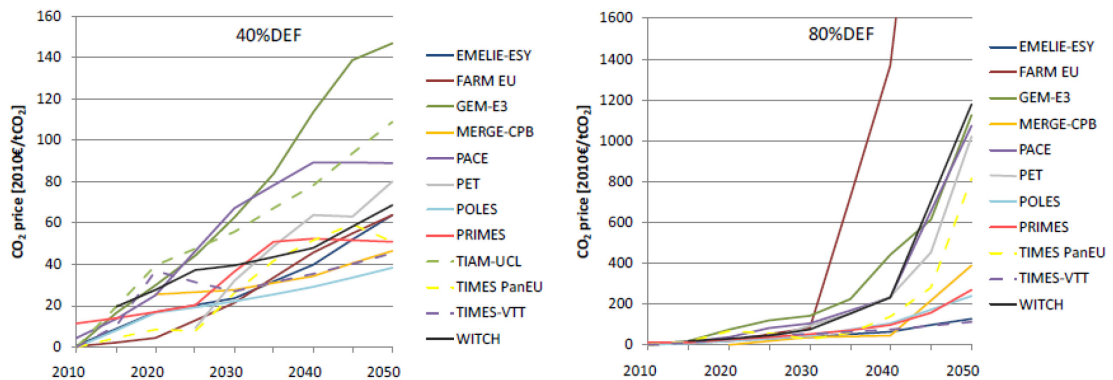


Figure 9. CO₂ prices for the default reference scenario 40%DEF (left) and the default mitigation scenario 80%DEF (right). Note the different scales (factor of 10 between 40%DEF and 80%DEF).

3.3.5 Veel gestelde vragen rond CO₂-prijzen

Hoe zijn de verschillen tussen CO₂-prijzen uit de literatuur te interpreteren? CO₂-prijzen uit de literatuur zijn, zeker als ze in de verre toekomst liggen, om twee redenen lastig te interpreteren.

Allereerst is het in veel gevallen niet duidelijk welke aanvullende aannames (alle aannames naast de aanname over de emissiereductiedoelstelling) ten grondslag liggen aan de in de literatuur gevonden waarden. Daarbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan aannames over het luchtbeleid, het energiebeleid en het gedrag van mensen, zoals eten van vlees, voorkeur voor schone brandstoffen en minder gebruik van de auto. En dat terwijl deze aannames van grote invloed kunnen zijn op de CO₂-prijs. Ten tweede zijn CO₂-prijzen voor 2050 in scenario's met grote (> 50 procent) CO₂-reducties erg onzeker. Om grote CO₂-afname te bewerkstelligen zullen steeds meer maatregelen genomen moeten worden. Dit zullen meer en meer maatregelen zijn waarvan de kosten en de mogelijke kostendaling op termijn nu nog slecht bekend zijn. Dat zorgt voor een toenemende onzekerheidsmarge in de schattingen van de toekomstige CO₂-prijs.

Waarom is een stijging van de CO₂-prijs normaal? Dat CO₂-prijzen over de tijd exponentieel stijgen is niet onlogisch. Vanuit de gedachte dat een regio een bepaald CO₂-budget heeft voor de rest van deze eeuw, maakt het namelijk niet zoveel uit op welk tijdstip een regio CO₂ reduceert. Echter als je vroeg begint met reduceren raakt het budget minder snel op. Laat beginnen met reductie vraagt om snelle en grote verminderingen, die combinatie is over het algemeen duur. Het tempo van de prijsstijging moet gelijk zijn aan het rendement dat kan worden behaald in een economie. Stel dat dat rendement 4 procent is en dat de CO₂-prijs met 7 procent per jaar stijgt. Door CO₂-rechten aan te kopen kan een investeerder dan een rendement van 7 procent per jaar behalen en dat terwijl een investering in de economie als geheel slechts 4 procent oplevert. Als investeerders dat inderdaad doen, dan zal de huidige vraag naar CO₂-rechten toenemen, waardoor de CO₂-prijs stijgt en het rendement erop daalt. Dit proces gaat door net zolang totdat de stijging van de CO₂-prijs gelijk is aan 4 procent.

Wat is de invloed van de economie op CO₂-prijzen? Hoewel op lange termijn onzeker is hoe de economische groei zich ontwikkelt, is de impact van die groei op de 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 olieprijsen. De huidige olieprijsen van 30-40 dollar per vat zetten de productie van schalie-olie evenwel onder druk. 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 kunnen 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 is het op korte termijn niet nodig allerlei dure maatregelen te nemen. Dit naar achteren verschuiven van de benodigde emissiereductie is tot op zekere hoogte 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-prijsen. Dit is bijvoorbeeld het geval bij emissiereducties van meer dan 80 procent in 2050.

Geeft een CO₂-prijs voldoende prikkel voor een energietransitie op de lange termijn? Hoewel tot 2030 de noodzaak om koolstofarme technologieën grootschalig in te zetten nog relatief 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 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 en scenario's met verdergaand klimaatbeleid.

Wat is het effect van Europees luchtbeleid⁴ op de CO₂-prijs? Bij de vaststelling van de CO₂-prijsen in de WLO-scenario's Laag en Hoog is geen rekening gehouden met luchtbeleid op Europese schaal⁵. Omdat veel maatregelen zowel de emissies van broeikasgassen als de emissies naar lucht verlagen, zal luchtbeleid leiden tot lagere CO₂-prijsen (Bollen & Brink 2012). Zeker voor scenario Hoog, waarin volgens de verhaallijn sprake is van een aanscherping van het luchtbeleid, zou het effect op de CO₂-prijsen behoorlijk kunnen zijn. Mocht daarom in een MKBA een positieve waarde toegekend worden aan vermindering van lucht-emissies dan moeten de CO₂-prijsen uit tabellen 2.2 en 2.3 hiervoor worden gecorrigeerd. Anders vindt er een dubbeltelling plaats. Omdat een daling van de CO₂ uitstoot zowel door klimaat- als luchtbeleid tot stand kunnen komen zijn de baten van klimaatbeleid te hoog als de CO₂-prijs niet naar beneden wordt bijgesteld. Ander beleid, zoals landbouwbeleid, kan ook als neveneffect tot een vermindering van broeikasgasemissies leiden (minder methaan of lachgas). Hoewel er in strikte zin dan wel sprake kan zijn van een dubbeltelling zal het alleen om niet-verwaarloosbare hoeveelheden kunnen gaan als het EU-breed beleid betreft. Van nationaal landbouwbeleid is daarom geen effect op de CO₂-prijs te verwachten.

⁴ Het Europese luchtbeleid is het brede palet aan Europees beleidsmaatregelen om de luchtkwaliteit te verbeteren. Veel luchtverontreinigende stoffen zoals fijn stof komen vrij bij verbrandingsprocessen waarbij ook CO₂ vrijkomt.

⁵ Bijvoorbeeld "the Clean Air Policy Package" (http://ec.europa.eu/environment/air/clean_air_policy.htm)

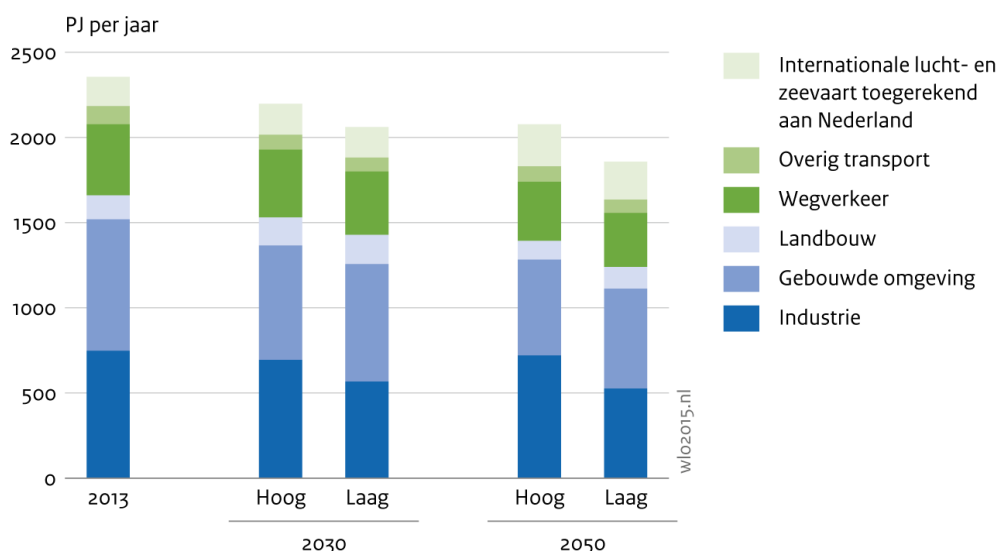
Is de CO₂-prijs een maat voor de gemiddelde kosten van CO₂-reductie over een bepaalde periode? Nee. De marginale kosten om de uitstoot van CO₂ te verminderen bepaalt de CO₂-prijs. Dat betekent dat de CO₂-prijs staat voor de duurste gebruikte technologie. De gemiddelde kosten om CO₂ te verminderen is per tCO₂ lager dan de CO₂ prijs. PBL & ECN (2012) kwam op een gemiddelde van ongeveer 70 euro/tCO₂ bij een CO₂-reductie van 80 procent in Nederland, terwijl schattingen voor een CO₂-prijs voor dat soort scenario's beginnen rond de 200 euro per tCO₂.

4 Sectorontwikkeling

Eerder is op hoofdlijnen beschreven, in hoofdstuk 2, hoe in de WLO klimaat en energie scenario's de ontwikkeling van de energievraag in Nederland en het mondiale klimaat samenhangen. In dit hoofdstuk zijn de energievraag en volume ontwikkelingen in 2030 en 2050 nader uitgewerkt voor de verschillende sectoren voor de WLO scenario's Laag en Hoog. Hier wordt toegelicht welke aannames en cijfers ten grondslag liggen aan de finale energievraag per sector (figuur 4.1). De aanvullende onzekerheidsverkenningen op WLO Hoog, de twee-gradenscenario's centraal en decentraal (zie sectie 5.2), hebben dezelfde macro-economie (volumegroei) en bevolking als het scenario Hoog. De finale energievraag is echter kleiner dan in het scenario Hoog door de aanname dat verdergaande energiebesparing plaats zal vinden. Ook vindt er een verdergaande vermindering plaats van de niet-CO₂ broeikasgassen ten opzichte van Hoog. In hoofdstuk 5.2 staat de uitwerking daarvan.

Figuur 4.1

Finaal energiegebruik per sector volgens WLO-scenario's



Bron: PBL/CPB

Het finale energiegebruik is de hoeveelheid energie die de eindgebruikers gebruiken. Het finale energiegebruik is hier 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 (2009/28/EC). Zo gaat er stroom verloren in het netwerk, tussen een elektriciteitscentrale en een stopcontact bij een eindverbruiker. Distributie- en transmissieverliezen bij elektriciteit zijn 5 à 10 procent van het totaal.

Het finale energiegebruik voor 2013 is 2185 petajoule volgens de nationale energieverkenning 2014 (Hekkenberg en Verdonk, 2014). De 2013 cijfers per sector zijn op basis van de tabellenbijlage behorend bij de nationale energieverkenning 2014.

De twee-gradenscenario's centraal en decentraal zijn voor wat betreft bevolkingsgroei en de macro-economische groei een variant op het WLO scenario Hoog. Dat betekent dat de volume ontwikkelingen zoals het aantal verreden kilometers door personenauto's en het aantal

tonnen staal dat wordt geproduceerd gelijk zijn aan die in het scenario Hoog. De finale energievraag is echter kleiner dan in Hoog als gevolg de veronderstelde verdergaande besparingen bij verkeer en vervoer, gebouwde omgeving en industrie.

4.1 Overzicht energievraag- en volumeontwikkeling

Annex 1 geeft een overzicht van de finale energievraag of volumeontwikkeling per deelsector zoals die in de modelanalyses zijn gebruikt. Het zijn cijfers voor het basisjaar 2013 en de zichtjaren 2030 en 2050 voor de WLO scenario's Laag en Hoog en de additionele onzekerheidsverkenningen, de tweegradenscenario's centraal en decentraal.

Hieronder wordt de onderbouwing gegeven van de cijfers bij de WLO scenario's Laag en Hoog voor de Gebouwde Omgeving, Verkeer en vervoer, Industrie en Landbouw. De inzet van de verschillende technologieën (energiemix) waarmee aan de finale energievraag kan worden voldaan is alleen begrensd door de uitstoot van broeikasgassen behorend bij het klimaatbeleid per scenario (zie ook Tabel 2.2). Daarmee heeft de benodigde mix een grote reeks aan oplossingsmogelijkheden. Kanttekeningen met betrekking tot de energiemix komen aan bod in hoofdstuk 5.

De ontwikkeling van de sectoren Landbouw en Verkeer en vervoer zijn conform zoals die zijn beschreven in de betreffende WLO thema cahiers (referenties). Er zijn geen thema cahiers voor de ontwikkeling van de sectoren Gebouwde Omgeving en Industrie (bedrijven). De ontwikkeling van deze sectoren is hieronder op hoofdlijnen gegeven.

4.2 Gebouwde omgeving

Voor de scenario's Laag en Hoog zijn simulaties van de energievraag en –aanbod uitgevoerd met het ruimtelijk energiemodel van de gebouwde omgeving Vesta (PBL 2012). Het Vesta model berekent het potentieel en de kosten van gebouw- en gebiedsmaatregelen om de energie efficiency te vergroten en de CO₂-uitstoot te verminderen. Het model berekent welke gebouwmaatregelen rendabel zijn om energie te besparen en produceren. Bovendien berekent het Vesta model de gebieden waar warmte en koude levering door gebiedsmaatregelen rendabel is. Daarbij kan rekening worden gehouden met in de toekomst gerealiseerde energiebesparingen. Naast de maatregelen die rendabel zijn wordt het vastgestelde beleid meegenomen. Onder het vastgestelde beleid wordt ook de EU-verplichting voor lidstaten verstaan om nieuwe gebouwen vanaf een bepaald jaar in de toekomst energieneutraal te bouwen.

De sector gebouwde omgeving is verdeeld in de deelsectoren woningen en utiliteit⁶. De ontwikkeling van de woningvoorraad en de utiliteitsgebouwen uitgedrukt in de vloeroppervlakte is één van de belangrijkste factoren die de toekomstige energievraag bepalen. De volumeontwikkeling wordt daarom als eerste hieronder behandeld. Vervolgens wordt ingegaan op de verbetering van de energie efficiency van de warmtevraag voor ruimteverwarming en warm tapwater. Daarna wordt de warmtevraag gepresenteerd als resultaat van volumeontwikkeling en efficiencyverbetering en komt ook de bijbehorende CO₂-uitstoot aan bod. Tenslotte wordt de elektriciteitsvraag van verlichting en apparaten voor huishoudelijk en zakelijk gebruik zoals koelkasten, computers en robots behandeld. Het energiegebruik voor koken (gas dan wel elektrisch) is buiten beschouwing gelaten wegens het geringe aandeel.

⁶ Overige gebouwen voor bijvoorbeeld diensten, handel of overheden.

4.2.1 Volume

Voor de energievraag van met name warmte is het van belang om het volume te onderscheiden in de bestaande gebouwen en de nieuwbouw in de komende decennia. De nieuwbouw wordt namelijk steeds energie-efficiënter waardoor de warmtevraag van deze gebouwen laag is. Vanaf 31 december 2020 wordt vereist dat nieuwe gebouwen vrijwel energieneutraal zijn. Per 31 december 2018 geldt dit al voor overheidsgebouwen. Een vrijwel energieneutraal gebouw is goed geïsoleerd waardoor de resterende warmtevraag laag is en maakt gebruik van hernieuwbare energiebronnen. Voor nieuwbouw is aangenomen dat deze energieprestatie-eis blijft gehandhaafd. Bij de bestaande bouw worden momenteel geen energieprestatie-eisen gesteld. In de scenario's Laag en Hoog is de ontwikkeling van de energieprestatie van bestaande gebouwen wel verschillend. Deze wordt hieronder behandeld bij de energie efficiency.

De ontwikkeling van het aantal woningen en arbeidsplaatsen is bepaald in de WLO thema's Macro-economie, Demografie en Regionale ontwikkelingen en verstedelijking (zie de betreffende WLO thema cahiers). De woningen en het aantal arbeidsplaatsen per regio zijn voor het Vesta model ruimtelijk verdeeld over locaties op postcode 6, adresniveau of raster van 100 x 100 meter. Daarbij zijn de arbeidsplaatsen omgezet in de vloeroppervlakte van utiliteitsgebouwen. Op deze manier houdt het Vesta model rekening met de ruimtelijke ontwikkeling in de scenario's. Dit is van belang voor de berekening van de gebiedsmaatregelen.

In tabel 4.1 is te zien dat het totaal aantal woningen is gegroeid met 2 procent in Laag en 21 procent in Hoog in 2050. Daar staat tegenover dat de bestaande woningvoorraad door sloop met 13 procent is afgenomen in Laag en met 19 procent in Hoog in 2050. Het energiegebruik van de bestaande woningvoorraad zal daarom in Hoog meer afnemen dan in Laag. Bij nieuwbouw is het andersom. De oppervlakte van utiliteitsgebouwen neemt met 2 procent toe in Laag en 17 procent in Hoog in 2050.

De bestaande utiliteitsgebouwen nemen met minder dan 1 procent af in Laag en met 27 procent in Hoog in 2050. Evenals bij woningen neemt daardoor het energiegebruik van de bestaande voorraad in Hoog meer af dan in Laag. Bij nieuwbouw is het andersom.

4.2.2 Energie efficiency warmtevraag

De energie-efficiency ontwikkeling van de warmtevraag wordt bepaald door de energieprijzen, de CO₂-prijs, de prijs van maatregelen zoals driedubbel glas en andere isolatie, natuurlijke momenten voor renovaties en stimuleringsmaatregelen van de overheid. De verbetering van de energie efficiency (Tabel 4.2) van woningen en utiliteitgebouwen is in de periode tot 2030 groter dan in de periode tot 2050, omdat de volumegroei in de eerste periode groter is. De grotere volumegroei wordt veroorzaakt door meer nieuwbouw en meer sloop, welke beide gunstig zijn voor de gemiddelde energie efficiencyverbetering van de totale voorraad van zowel woningen als utiliteitsgebouwen.

Specifiek voor de bestaande woningen zien we dat de energie efficiencyverbetering in de periode tot 2030 gelijk is aan de periode tot 2050.

De jaarlijkse energie efficiencyverbetering, waarin de volumeontwikkelingen zijn verdisconteerd, leidt tot een gemiddelde warmtevraag van de woning van 85 procent in Laag en 69 procent in Hoog in 2050 ten opzichte van 2013. De gemiddelde warmtevraag van de bestaande woning neemt af tot 98 procent in Laag en 83 procent in Hoog in 2050. De gemiddelde warmtevraag per oppervlakte-eenheid van de utiliteit neemt af tot 86 procent in Laag en 59 procent in Hoog in 2050 ten opzichte van 2013.

4.2.3 Warmtevraag en CO₂-uitstoot

De ontwikkeling van de absolute omvang van de energievraag is het gevolg van de hierboven beschreven ontwikkelingen van het volume en de energie efficiencyverbetering. De warmtevraag van de deelsector woningen neemt af tot 87 procent in Laag en tot 84 procent in Hoog in 2050 ten opzichte van 2013 (zie index tabel 4.1). Kijken we naar alleen de bestaande woningen dan neemt de warmtevraag af tot 85 procent in Laag en 67 procent in Hoog in 2050.

De CO₂-uitstoot van de gebouwde omgeving neemt af tot 65 procent in Laag en 35 procent in Hoog ten opzichte van 2013. Dit is het resultaat van de afgenomen warmtevraag en de verduurzaming van het warmteaanbod met name warmtepompen en warmte- en koudnetten (zie ook hoofdstuk 5).

Tabel 4.1 Ontwikkeling van volume, warmtevraag per eenheid en warmtevraag van de gebouwde omgeving in de scenario's Laag en Hoog.

			2030		2050	
			Laag	Hoog	Laag	Hoog
Volume			Index 2013 =100			
Woningen	7.3 ^a	miljoen woningen	104	113	102	121
w.v. bestaand	7.3 ^a	miljoen woningen	95	91	87	81
Utiliteit	381	miljoen m ² bvo ^b	102	109	102	117
Warmtevraag per eenheid						
Woningen	48	gigajoule/woning	90	81	85	69
w.v. bestaand	48	gigajoule/woning	98	92	98	83
Utiliteit	0.45	gigajoule/m ² bvo ^b	92	78	86	59
Warmtevraag						
Woningen	345	petajoule	93	92	87	84
w.v. bestaand	345	petajoule	93	84	85	67
Utiliteit	170	petajoule	94	84	88	69
CO₂-uitstoot						
Gebouwde omgeving	31	Mton CO ₂	82	64	65	35

a) Cijfers conform CBS definitie tot 2012. De nieuwe CBS definitie gebruikt de Landelijke Voorziening Basisregistraties Adressen en Gebouwen (LV BAG). Op basis van die cijfers waren er in 2013 ca 3% meer woningen, 7.5 miljoen, dan volgens de oude definitie die hier is gebruikt.

b) bvo = brutovloeroppervlakte

Tabel 4.2 Ontwikkeling energie efficiencyverbetering van de gebouwde omgeving in de WLO scenario's Laag en Hoog.

			2013 - 2030		2013 - 2050	
			Laag	Hoog	Laag	Hoog
Energie efficiencyverbetering						
Woningen		Procent per jaar	0.6	1.2	0.4	1.0
w.v. bestaand		Procent per jaar	0.1	0.5	0.1	0.5
Utiliteit		Procent per jaar	0.5	1.5	0.4	1.4

4.2.4 Elektriciteitsvraag

De ontwikkeling van de elektriciteitsvraag van de deelsectoren woningen en utiliteitgebouwen is weergegeven in de Tabel Annex 1. Hierbij is geen onderscheid gemaakt tussen bestaande gebouwen en nieuwbouw omdat de elektriciteitsvraag hetzelfde is in bestaande

gebouwen en nieuwbouw. De elektriciteitsvraag wordt bepaald door de volumegroei van woningen en utiliteitsgebouwen, de toename in het gebruik van verlichting en apparaten per woning en oppervlakte-eenheid van de utiliteit en de verbetering van de energie efficiency van verlichting en apparaten. Voor de deelsector woningen leiden de effecten hiervan per saldo tot een afname van de elektriciteitsvraag tot 93 procent in Laag en een toename tot 130 procent in Hoog ten opzichte van 2013. In de utiliteitssector neemt de elektriciteitsvraag af tot 43 procent in Laag en 61 procent in Hoog in 2050 ten opzichte van 2013.

4.3 Verkeer en vervoer

De verhaallijnen en achtergronden bij verkeer en vervoer zijn uitgewerkt in WLO Mobiliteit (2015) en het bijbehorende achtergronddocument. In deze paragraaf gaan we in op de aannames rond het energiegebruik (technologie-inzet) en de daarmee samenhangende broeikasgasuitstoot.

Energiegebruik, volumegroei en uitstoot van broeikasgassen door verkeer en vervoer is onderverdeeld in wegverkeer, overig transport en internationale lucht- en zeevaart. De eerste twee hebben betrekking op binnenlands verkeer en vervoer en de uitstoot ervan valt onder nationale en internationale afspraken. De internationale lucht- en zeevaart is voor wat betreft de broeikasgasuitstoot in beperkte mate gereguleerd. De internationale luchtvaart valt in principe onder het Europese emissiehandelssysteem. Tot nu toe echter betreft het alleen de vluchten binnen de Europese Economische Ruimte⁷. De internationale organisatie voor burgerluchtvaart (ICAO) is bezig met de ontwikkeling van een marktgebaseerd mechanisme om de CO₂-uitstoot door de internationale luchtvaart te verminderen (zie ook EU 2014). In WLO Laag is de aanname dat het huidige systeem wordt gehandhaafd en in WLO Hoog zal er een mondiaal handelssysteem komen waarvan zowel internationale lucht- als zeevaart onderdeel uit maken. Welk deel van het internationale transport aan Nederland valt toe te schrijven is moeilijk objectief te bepalen. Als indicatie daarvoor is in de WLO een deel van het mondiale energieverbruik door de gehele internationale lucht- en zeevaart toegerekend aan Nederland op basis van het aandeel bbp van het wereld totaal.

4.3.1 Wegverkeer en overig transport

De volumegroei van het wegverkeer in de scenario's Laag en Hoog in 2030 en 2050 ten opzichte van 2010 staat voor de belangrijkste onderdelen weergegeven in Tabel 4.3. De volumes in de tweegradenscenario's zijn identiek aan die in Hoog.

Tabel 4.3 Volume ontwikkeling personenauto's, bestelauto's en zwaar vrachtverkeer in miljard kilometers.

	2010	2030		2050	
		Laag	Hoog	Laag	Hoog
	miljard km	index 2010 = 100			
personenauto's	102.3	109	126	118	147
bestelauto's	17.3	102	114	109	130
zwaar vrachtverkeer	7.2	104	113	105	125

Het bijbehorende finale energieverbruik en CO₂-uitstoot is afhankelijk van de inzet van verschillende technologie vormen. De belangrijkste aannames hierbij hangen samen met de gestelde CO₂-uitstoot-eisen voor het wegverkeer.

⁷ Europees Economische Ruimte bestaat uit de 28 lidstaten van de Europese Unie en IJsland, Noorwegen en Liechtenstein.

Tabel 4.4 Ontwikkeling CO₂-uitstoot door wegverkeer en overig transport (megaton CO₂).

	2010*	2030		2050	
		Laag	Hoog	Laag	Hoog
Wegverkeer	34	23	25	19	18
Overige transport	5	5	6	5	5

* de gerealiseerde CO₂-uitstoot is berekend volgens de IPCC benadering, op basis van de afzet van motorbrandstoffen.

Wegverkeer bestaat hier uit personenauto's, bestelauto's en zwaar vrachtverkeer en overig transport is de optelsom van bussen, motor- en bromfietsen, mobiele werktuigen, recreatievaartuigen, diesellocomotieven, defensievoertuigen, binnenvaart en visserij en binnenlandse lucht- en zeevaart.

Ongeveer tweederde van de CO₂-uitstoot van wegverkeer (Tabel 4.4) komt voor rekening van personenauto's. Op de korte termijn, tot 2030, komt de belangrijkste bijdrage aan de energiebesparing voor rekening van de reeds vastgestelde aanscherping van de Europese CO₂-norm voor nieuwe personenauto's naar 95 gram CO₂ per kilometer in 2021. Dit geldt voor zowel Laag als Hoog. Na 2030 wordt in Laag de norm aangescherpt tot 70 gram CO₂ per kilometer in 2050 en in Hoog tot 55 gram CO₂ per kilometer. Daarnaast wordt in Hoog de testmethode meer in lijn gebracht met de praktijk. Dat betekent dat de werkelijke uitstoot gemiddeld over het wagenpark beter overeen gaat komen met de gestelde norm

Een besparing van energie en CO₂-uitstoot vindt plaats door zuiniger verbrandingsmotoren of andere brandstoffen zoals LPG en veranderende mix (hybride, plug-in hybride en vol-elektrisch). Om de norm te bereiken is een verschillende mix van technologieën ingezet. Het gaat vooral om de penetratie van (semi)-elektrische auto's en bijmenging van biobrandstof bij de productie van vloeibare fossiele brandstoffen, verdere ontwikkeling van zuiniger verbrandingsmotoren en een verschuiving naar kleinere auto's. Zowel in Laag als Hoog zijn personen- en bestelauto's in 2030 ongeveer een kwart zuiniger dan in 2010 en in 2050 in Laag ongeveer 40 procent en in Hoog 50 procent zuiniger dan in 2010.

Tabel 4.5 Ontwikkeling elektrisch personenvervoer en bijmenging biobrandstoffen (procenten).

	2010	2030		2050	
		Laag	Hoog	Laag	Hoog
Elektrisch verreden kilometers	0	4	6	10	20
Bijmenging biobrandstof	3	10	10	10	20

In Hoog is er meer nadruk gelegd op de inzet van schonere motoren en kleinere auto's dan op groei van elektrische personenauto's. De groei van elektrisch personenauto's hangt af van de kostendaling van accu's voor elektrische auto's. Die is nog erg onzeker. De percentages elektrisch verreden kilometers (Tabel 4.5) reflecteren een conservatieve inschatting van die kostendaling. Als de kosten sterker dalen dan zal de CO₂-uitstoot door verkeer verder kunnen afnemen⁸. Bijvoorbeeld als alle personenverkeerkilometers in 2050 in Hoog elektrisch zouden worden verreden, zou de CO₂-uitstoot met 12 megaton extra verminderen (mits de gebruikte elektriciteit volledig CO₂-neutraal opgewekt is). De CO₂ uitstoot bij vrachtverkeer wordt tegen gegaan door de inzet van biobrandstoffen. Daarnaast is geen extra energie of

⁸ Binnen een scenario is de totale CO₂ overigens een gegeven en zal dus niet veranderen.

CO₂-besparingstechnologie verondersteld, behalve in het scenario Hoog in 2050 (15 procent zuiniger motoren ten opzichte van 2010).

Tabel 4.6 Ontwikkeling vloeibare brandstof gebruik overig transport (petajoule).

	2010	2030		2050	
		Laag	Hoog	Laag	Hoog
	petajoule	index 2010 = 100			
Overige transport	98	85	89	82	94

Het overige transport op basis van vloeibare brandstoffen ontwikkelt zich zoals gegeven in Tabel 4.6. Deze cijfers geven netto het beeld van volumegroei en energiebesparing. Bovenop de besparing van tussen 5 en 10 procent in 2050 en bijmenging van biobrandstoffen (Tabel 4.5) is geen specifieke CO₂-arme technologieën verondersteld.

Het elektrisch vervoer buiten de elektrische auto's (trein, tram en metro, trolleybussen etcetera) heeft een relatief kleine energievraag van ongeveer 7 petajoule in 2010 (1.9 teraWattuur). De energievraag neemt als gevolg van volumegroei en besparing licht toe tot 2050 met 5 procent in Laag tot 15 procent in Hoog ten opzichte 2010.

4.3.2 Internationale lucht- en zeevaart

De uitstoot van broeikasgassen door de internationale lucht- en zeevaart maakt nu ongeveer 2 à 3 procent uit van de totale mondiale uitstoot van broeikasgassen. Een deel hiervan is toe te rekenen aan Nederland. In de WLO scenario's is hiervoor een inschatting gemaakt. De broeikasgasuitstoot van deze sector is nog niet gereguleerd. Tegelijkertijd is er in het scenario Hoog en de tweegradenscenario's relatief veel klimaat beleid verondersteld. In de bijbehorende verhaallijn worden internationale lucht- en zeevaart onderdeel van efficiënt vormgegeven internationaal klimaatbeleid.

In de WLO klimaat en energiescenario's is daarom een indicatie gegeven om hoeveel het dan zou kunnen gaan. Dat is extra van belang omdat volumegroei verschilt tussen de scenario's Laag en Hoog. We schatten de Nederlandse bijdragen op 1 procent van het mondiale energiegebruik in de internationale lucht- en zeevaart (Tabel 4.7). Dat aandeel van 1 procent is gelijk aan het gemiddelde bbp-aandeel van Nederland aan het mondiaal totaal gedurende de laatste jaren. Hoewel dat aandeel waarschijnlijk in de toekomst zal verminderen is het voor de helderheid constant verondersteld.

Tabel 4.7 Het energiegebruik door de internationale lucht- en zeevaart toegerekend aan Nederland (petajoule).

	2013	2030		2050	
		Laag	Hoog	Laag	Hoog
Internationale luchtvaart	84	93-113	97-124	125	133
Internationale zeevaart	103 ⁹	85-99	83-109	96	112

Het finale energiegebruik in 2013 (tabel 4.7) is afgeleid van de schatting voor de mondiale CO₂-uitstoot door de luchtvaart van grofweg 600 megaton CO₂ (ICAO, 2013) en 800 megaton CO₂ door de zeevaart (IMO, 2014) en een gemiddelde CO₂-emissiefactor voor kerosine en stookolie. Beide scenario's, Laag en Hoog, kennen een forse toename van alle mobiliteit in de wereld (Tabel 4.8). Het tempo waarin de groei naar 2050 gestalte krijgt is onzeker. Twee

⁹ Voor 2013 vond ongeveer 17 procent van het energiegebruik door internationale zeevaart binnengaats plaats. Ongeveer 17 van de 103 petajoules aan 'Overig verkeer' toegekend. Dat onderscheid is alleen gemaakt voor 2013, niet voor de WLO scenario's in 2030 en 2050.

mogelijkheden zijn weergegeven voor 2030: of de groei blijft initieel achter (in Figuur 4.1) en zet pas goed door na 2030 of de groei van internationaal transport start snel en neemt na 2030 langzamer toe.

Tabel 4.8 Volumegroei van de internationale lucht- en zeevaart toegerekend aan Nederland¹⁰.

	2013	2030		2050	
		Laag	Hoog	Laag	Hoog
	index 2013 = 100				
Internationale luchtvaart	100	130-160	140-180	210	250
Internationale zeevaart	100	90-110	100-130	120	170

Tussen 2013 en 2050 is er efficiencyverbetering mogelijk (IEA, 2009); in de luchtvaart met 30 procent in Laag en 37 procent in Hoog. In de zeevaart is dat in Laag 25 procent en in Hoog 38 procent. Daarnaast wordt de uitstoot van CO₂ extra verminderd door de aanname dat ook bij internationale lucht- en zeevaart bijmenging van biobrandstoffen plaatsvindt conform Tabel 4.5.

Tabel 4.9 Schatting voor de CO₂-uitstoot door de internationale lucht- en zeevaart toegerekend aan Nederland (megaton CO₂).

	2013	2030		2050	
		Laag	Hoog	Laag	Hoog
Internationale lucht- en zeevaart	14	12-14	12-16	15	15

Tabel 4.9 laat zien dat de CO₂-uitstoot van de internationale lucht- en zeevaart min of meer constant blijft omdat de volumegroei gelijke tred houdt met efficiencyverbeteringen tussen 2013 en 2050. De CO₂-uitstoot door het 'Nederlandse' deel van de internationale lucht- en zeevaart speelt overigens geen rol¹¹ bij de CO₂-reductiedoelen in 2030 en 2050 (Tabel 2.2), die sturend zijn voor de verschillende WLO-scenario's. Wel is er rekening gehouden met de broeikasgasemissies in de productieketen van de daarvoor benodigde vloeibare brandstoffen.

Het internationale klimaat- en energiebeleid vormt een belangrijke onzekerheid voor de ontwikkeling van de lucht- en zeevaart, vanwege de mogelijke impact die het heeft op de brandstofkosten. Brandstofkosten vormen in de internationale lucht- en zeevaart een belangrijk bestanddeel van de totale transportkosten, belangrijker dan bij de meeste andere modaliteiten. Stringent klimaatbeleid betekent een snel toenemende CO₂-prijs. Het betekent ook dat als de lucht- en zeevaart onderdeel zou worden van een internationaal emissiehandelsstelsel (op mondiale schaal), zij daaraan gaan meebetalen. Dat maakt het duurder. Het loont dan ook om zuiniger met brandstof om te gaan, bijvoorbeeld door technologische verbeteringen. Naarmate brandstofprijzen hoger zijn, bijvoorbeeld omdat er een (hogere) CO₂-prijs moet worden betaald, zullen technologische verbeteringen op dit punt sneller beschikbaar komen afhankelijk van de mate van technologische ontwikkeling. Dat betekent mogelijk ook dat de impact van een vliegtuig op het milieu afneemt (geluid, luchtverontreinigende stoffen, CO₂).

¹⁰ De groei van de internationale lucht- en zeevaart zijn afgeronde cijfers op basis van WLO resultaten voor Luchtvaart en Overslag in Nederlandse zeehavens (WLO Mobiliteit, 2015).

¹¹ Afgezien van de CO₂-uitstoot als gevolg van vluchten binnen de Europees Economische Ruimte.

4.4 Industrie

De sector industrie (bedrijven) is voor wat betreft energierelevante onderdelen samengevat met een overall elektriciteitsvraag, warmtevraag (lage temperatuur, hoge temperatuur en zeer hoge temperatuur) en volumeontwikkeling bij de productie van staal, kunstmest en grondstoffen voor plastics. De cijfers zoals gegeven in de tabel in Annex 1 maken onderscheid tussen de WLO scenario's Laag en Hoog op basis van fysieke groei en efficiencyverbeteringen voor 2050 ten opzichte van het basisjaar 2013. De waarden voor 2030 zijn bepaald door lineaire interpolatie.

De overall elektriciteitsvraag in 2050 groeit in Laag met 17 procent en in Hoog met 38 procent. Dit is het gevolg van volumegroei in de industrie, verdergaande elektrificatie van industriële processen en efficiencyverbetering.

De warmtevraag daalt in Laag met ongeveer 20 procent en in Hoog met ongeveer 10 procent. Dit is het gevolg van een volumegroei van 10 procent in Laag en 50 procent in Hoog in combinatie met een besparing van 1 procent per jaar in Laag en 1.5 procent per jaar in Hoog. De totale warmtevraag verschilt in grootte voor de temperatuur ranges < 100°C (Lage Temperatuur), 100°C-500°C (Hoge Temperatuur) en > 500°C (Super Hoge Temperatuur).

Tabel 4.10 De elektriciteitsvraag (teraWattuur) en warmtevraag (petajoule) in de industrie*.

	2013	2030		2050	
		Laag	Hoog	Laag	Hoog
Elektriciteitsvraag	30	33	36	35	41
Warmtevraag_SHT	90	80	85	70	80
Warmtevraag_HT	95	85	90	75	86
Warmtevraag_LT	125	113	117	100	110

* exclusief de elektriciteits- en warmtevraag als gevolg van de productie van staal, plastic grondstoffen en kunstmest (zie hieronder)

Productiecijfers voor 2050 van staal, kunstmest en grondstoffen voor plastics zijn een belangrijke input voor de energievraag van die onderdelen van de industrie op de lange termijn. De staalproductie kent in Laag een kleine afname van 3 procent en in Hoog een lichte stijging van 3 procent. De productie van kunstmest blijft in Laag constant terwijl in Hoog het volume groeit met 18 procent. In Laag is er geen volumegroei van grondstoffen voor plastics, terwijl in Hoog het volume met 13 procent groeit.

Tabel 4.11 Volumegroei grondstoffen industrie.

	2013	2030		2050	
		Laag	Hoog	Laag	Hoog
	Mton	index 2013 = 100			
Staal	7	99	101	97	103
Kunstmest	1.9	100	109	100	118
Grondstoffen plastics	4.3	100	106	100	113

4.5 Land- en tuinbouw

In 2013 is de energievraag van de sector land- en tuinbouw gedomineerd door die van de glastuinbouw met 75 procent van de elektriciteitsvraag en 95 procent van de warmtevraag

(Compendium voor de Leefomgeving). Voor een beschouwing over de ontwikkelingen in de WLO scenario's Laag en Hoog verwijzen we naar het betreffende thema cahier (WLO Landbouw 2015).

Samenvattend zien we dat in de glastuinbouw het areaal afneemt met in Laag 30 procent en in Hoog 10 procent. De veranderingen van de elektriciteits- en warmtevraag in de land- en tuinbouw is evenredig verondersteld met bovenstaande areaalveranderingen. Daarbovenop is er een efficiencyverbetering door onder andere de introductie van energie- of klimaatneutrale kassen. In 2050 wordt een efficiencyverbetering bereikt van 5 procent in Laag en 20 procent in Hoog. Een klein deel van de warmtevraag wordt geleverd als restwarmte (aanvoer van warm water van buiten de land- en tuinbouw). De aanvoer van restwarmte is constant verondersteld in Laag en groeit met 30 procent in Hoog, onder andere door veronderstelde uitbreidingen van het warmteaanbod. De waarden voor 2030 zijn bepaald door lineaire interpolatie.

Tabel 4.12 De elektriciteitsvraag (teraWattuur), warmte- en restwarmtevraag (petajoule) in de land- en tuinbouw.

	2013	2030		2050	
		Laag	Hoog	Laag	Hoog
Elektriciteitsvraag	7.0	5.8	6.0	4.7	5.0
Warmtevraag	90	75	77	60	65
Restwarmtevraag	5.0	5.0	5.0	5.0	6.5

4.6 Afvalverbranding

In 2013 is er ongeveer 16 petajoule afval beschikbaar voor energieproductie in afvalverbrandingsinstallaties (avi's). Deze hoeveelheid neemt iets af tot 15 petajoule in 2050 als gevolg volumegroei en efficiencyverbetering. De volumegroei is groter in Hoog dan in Laag, maar daartegenover staat dat Hoog weer een grotere efficiencyverbetering heeft van materiaalstromen. Netto is er geen verschil in de hoeveelheid afval beschikbaar voor energieopwekking tussen de WLO scenario's Laag en Hoog.

4.7 Niet-CO₂ broeikasgassen

Voor de mondiale opwarming spelen ook niet-CO₂ broeikasgassen een rol. De uitstoot ervan is slechts in beperkte mate gerelateerd aan het energiesysteem. In de WLO is een schatting gemaakt voor de uitstoot van niet-CO₂ broeikasgassen door de landbouw en door overige bronnen.

Het gaat hierbij met name om methaan, distikstofoxide en, in mindere mate, om fluorhoudende gassen (F-gassen). De uitstoot van deze broeikasgassen is in Nederland tussen 1990 en 2013 gehalveerd van ongeveer 60 tot 30 megaton CO₂-equivalent. Deze daling compenseerde zelfs een lichte stijging, met enkele procenten, van de CO₂-uitstoot 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).

In 2013 was ongeveer 60 procent van de uitstoot van de niet-CO₂ broeikasgassen in Nederland gekoppeld aan landbouwactiviteiten (methaan in de rundveehouderij en lachgas bij het landgebruik). Een klein deel van de niet-CO₂ broeikasgassen in Nederland (minder dan 10 procent) is methaan dat vrijkomt in het energiesysteem: onverbrand of als lekkage. Het aandeel van F-gassen aan de niet-CO₂ broeikasgassen is beperkt (9 procent). In 2013 was meer dan twee-derde van de uitstoot van F-gassen het gevolg van het gebruik van fluor-koolwaterstoffen (HFK's) in koelinstallaties. De uitstoot van de niet-CO₂-broeikasgassen staat dus grotendeels los van het energiesysteem.

De WLO scenario's Laag en Hoog hebben een eigen ontwikkeling van de niet-CO₂-broeikasgassen (Tabel 4.13). De uitstoot van de 'overige bronnen' in tabel 4.13 omvat ook de uitstoot van niet-CO₂ broeikasgassen die vrijkomen in het energiesysteem zoals bij warmtekracht installaties (WKK) en aardgaswinning. Het gaat hierbij om 1 à 2 megaton CO₂-equivalenten. Gedrag, bevolkingsgroei en de ontwikkelingen in de landbouw spelen hierbij een sturende rol (zie ook thema cahier WLO Landbouw 2015). De uitstoot door overige bronnen van niet-CO₂ broeikasgassen zal in 2050 naar verwachting met ongeveer 40 procent in Laag tot 60 procent in Hoog verminderen ten opzichte van 2013.

Tabel 4.13 Uitstoot niet-CO₂ broeikasgassen (in megaton CO₂-equivalenten).

	2013	2030		2050	
		Laag	Hoog	Laag	Hoog
Landbouw	18	17	16	16	14
Overige bronnen	11	8	7	7	4

5 Technologie-ontwikkeling

In beide WLO scenario's neemt de finale vraag naar energie af als gevolg van de economische groei en een toename van de energie efficiency (Figuur 4.1). Hoe kan aan de finale energievraag worden voldaan zodat het vooropgestelde reductiedoel van broeikasgassen (Tabel 2.2) kan worden gerealiseerd? Dit hoofdstuk gaat over de mix van energie technologieën: welke mix is optimaal om het energiesysteem te verduurzamen volgens een vooropgesteld reductiedoel en wat is de onzekerheid daarbij. Aan bod komen de technologieën die een rol spelen bij de verduurzaming van de elektriciteitsproductie, warmtevoorziening en de productie van vloeibare brandstoffen. Daarnaast gaan we specifiek in op welke manier de tweegradenscenario's verschillen. Hoe komt het verschil tussen de centrale mix van energie technologieën en decentrale mix tot uitdrukking?

5.1 Mix van energie technologieën

Om de mix van energie technologieën vast te stellen waarmee zowel aan de vraag kan worden voldaan als aan het vooropgestelde broeikasgas reductiedoel is het E-designmodel gebruikt (zie ook hoofdstuk 2). Het E-designmodel is ook gebruikt bij de studie 'Naar een schone economie in 2050, routes verkend' (PBL & ECN 2012). Deze studie en ook anderen (Knopf et al. 2013) maken duidelijk dat er veel verschillende manieren zijn waarop een specifiek broeikasgas reductiedoel bereikt kan worden (zie figuur 5.1). Er zijn namelijk tal van koolstofarme energie technologieën die kunnen worden ingezet, zowel bestaande als nog (verder) te ontwikkelen technologieën.

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.

Voorbeelden van koolstofarme energie technologieën zijn: windmolens op zee en op land, zonnecellen voor elektriciteit en zonnecollectoren voor warmte, gebruik van waterstof, uranium, biomassa, biogas of biobrandstoffen voor de opwekking van energie, elektrische warmtepompen, gebruik van warmte-kracht-koppeling, warmte-koude-opslag en aardwarmte (geothermie).

Daarnaast kan een (energie) technologie waar CO₂ bij vrijkomt koolstofarm worden gemaakt door de vrijkomende CO₂ af te vangen en ondergronds op te slaan (Carbon Capture and Storage, CCS). CCS is potentieel een belangrijke technologie die het gebruik van fossiele brandstoffen mogelijk maakt zonder dat er veel CO₂ in de atmosfeer komt. CCS wordt met name gezien als technologie die een overgang van fossiele energie naar hernieuwbare energie kan ondersteunen. Ook kan CCS worden gecombineerd met CO₂ uit biomassa. In dat geval wordt per saldo CO₂ uit de lucht verwijderd en treedt een negatieve emissie op. CCS is evenwel een technologie die nog in ontwikkeling is.

5.1.1 Energiemix en onzekerheid

Er zijn veel verschillende technologie mixen mogelijk die in de WLO scenario's tot voldoende (zie tabel 2.2) broeikasgas reductie leiden. Welke mix het in de toekomst precies zal worden, kan door de onzekerheid over de kostenontwikkeling van deze technologieën niet a priori worden vastgesteld. Andere wegen zijn daarom net zo goed mogelijk. De energietechnologiemix en resultaten ervan, zoals ze zijn toegepast in de WLO scenario's, moeten daarom als illustratie worden gezien. Hierbij geldt de energiemix van 2013 als uitgangspunt. De keuzes die de energiemix in de WLO scenario's voor 2030 en 2050 brengen zijn in feite dus arbitrair. Echter ze zijn gemaakt met onderstaande randvoorwaarden naast de sectorontwikkelingen in Laag en Hoog in hoofdstuk 4. Deze veronderstellingen liggen in het verlengde van het huidige ontwikkelingen en zijn consistente combinaties die passen binnen de WLO verhaallijnen.

- Toepassing van CCS in Hoog maar niet in Laag. In 2030 en 2050 verschilt de mate van CCS tussen Hoog en de tweegradenscenario's onderling (zie figuur 4.4 in WLO Klimaat en Energie 2015). CCS wordt vooral toegepast bij de vergassing van biomassa en bij het gebruik van fossiele brandstoffen voor de elektriciteitsproductie. Dit is het meest efficiënt bij grote elektriciteitscentrales.
- Het bijmengpercentage van biobrandstoffen verschilt in 2050 tussen Laag en Hoog (zie tabel 4.5).
- Windenergie: het opgesteld vermogen op land¹² blijft in 2030 beperkt tot 5 in Laag en 7 gigaWatt in Hoog. Tussen 2030 en 2050 is er nog een beperkte groei tot 6 in Laag en 8 gigaWatt in Hoog. Het windvermogen op zee¹³ wordt verondersteld sterker te groeien: in 2030 tot 7 in Laag en 10 gigaWatt in Hoog. Tussen 2030 en 2050 is er verdere groei tot 7 in Laag en 16 gigaWatt in Hoog.
- Zon-PV: het opgestelde vermogen¹⁴ in 2030 is 5 in Laag en 10 gigaWatt in Hoog. Tussen 2030 en 2050 is er verdere groei tot 12 in Laag en 19 gigaWatt in Hoog.
- De toepassing van kolen voor de opwekking van elektriciteit vermindert sterk tussen 2013 en 2050. Van circa 25 procent in 2013 tot ongeveer 5 procent van de elektriciteitsopwekking in 2050 is op basis van kolen. Een complete uitfasering van het gebruik van kolen voor de opwekking van elektriciteit maakt het gemakkelijker om een CO₂-doel te behalen daarvoor is wel voldoende alternatieve opwekkingscapaciteit nodig.
- De toepassing van gas voor de opwekking van elektriciteit vermindert ook tussen 2013 en 2050. Van circa 55 procent in 2013 tot ongeveer 20 procent in Laag en 10 procent in Hoog van de elektriciteitsopwekking in 2050 is op basis van gas.
- De toepassing van uranium voor de opwekking van elektriciteit blijft onveranderd tussen 2013 en 2050.

Figuur 5.1 geeft als voorbeeld een aantal samenstellingen weer die qua kosten binnen de onzekerheidsmarges equivalent zijn en die in 2050 allemaal tot een reductie van 80 procent leiden (PBL & ECN 2012). De figuur maakt duidelijk dat er veel verschillende manieren zijn om tot vermindering van de CO₂ uitstoot te komen. Deze reeks van voorbeelden is overigens niet uitputtend, zo is kernenergie als koolstofarme energietechnologie hier niet meegenomen. Bij een tweegradenscenario is het nog niet duidelijk met welke technologiemix het broeikasgas einddoel het goedkoopst kan worden gehaald. 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. Daarnaast wordt naarmate het klimaatbeleid stringenter is de keuzevrijheid kleiner, bijvoorbeeld om een kool-

¹² Op basis van 2500 vollasturen per jaar voor wind-op-land.

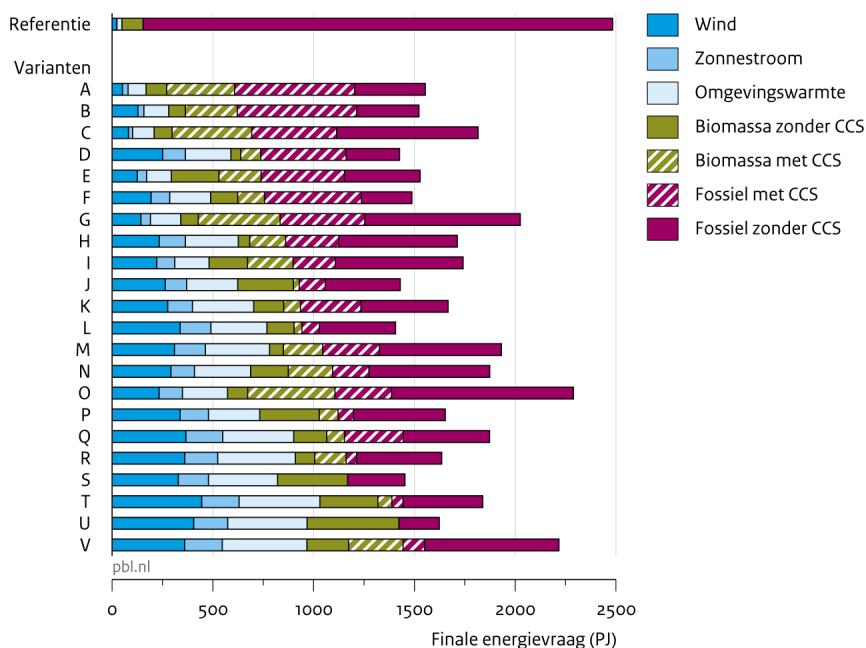
¹³ Op basis van 4200 vollasturen per jaar voor wind-op-zee.

¹⁴ Op basis van 850 vollasturen per jaar voor zon-PV.

stofarme technologie uit te sluiten. Daarom is het verstandig om een brede portefeuille van CO₂-arme technologie tot ontwikkeling te brengen (Aalbers et al. 2013).

Figuur 5.1

Opties voor invullen van energievraag in 2050 bij 80% emissiereductie ten opzichte van 1990



Bron: PBL model E-design

5.1.2 Elektriciteitsproductie

De elektriciteitsproductie is de sector die het snelst en goedkoopst kan worden verduurzaamd. Bestaande hernieuwbare productie technologieën zoals windenergie en zonnecellen worden meer en meer ingezet. In 2013 was circa 10 procent van de elektriciteitsproductie uit hernieuwbare bronnen¹⁵. Zowel in scenario Laag als Hoog komt in 2030 meer dan de helft van de elektriciteit uit wind en zon. In 2050 is het aandeel verder toegenomen tot ongeveer 70 procent in Laag en bijna 80 procent in Hoog. Het aandeel op basis van fossiele brandstoffen (gas en kolen) neemt af; in 2030 niet meer dan 40 procent en in 2050 ongeveer 25 procent in Laag en 15 procent in Hoog. In Hoog wordt de CO₂ uitstoot die hierbij plaats vindt verminderd door meestook van biomassa en de toepassing van CCS. Op basis van de verhaallijn in Laag (lage CO₂-prijs en beperkte technologieontwikkeling) is grootschalige toepassing van CCS in Laag uitgesloten. Andersom, wordt verondersteld dat de omstandigheden zodanig zijn dat CCS rond 2030 in scenario Hoog wel grootschalig wordt toegepast. 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 en om voldoende leerervaring op te doen voor onder andere kostendaling. Op dit moment is er één CCS-demonstratieproject in Nederland: het Rotterdam Opslag en Afvang Demonstratieproject (ROAD) dat volgens de huidige planning in 2019-2020 van start zal gaan.

Voor wind-op-zee is het potentieel in principe veel groter dan voor wind-op-land, simpelweg als gevolg van ruimtelijke beperkingen op het land. Daarnaast 'oogst' een windmolen op zee gemiddeld meer elektriciteit dan een windmolen op land. De kosten zijn echter hoger, zeker

¹⁵ <http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl/indicatoren/nl0517-Hernieuwbare-elektriciteit.html?i=9-53>

als er windmolenparken op de diepere gedeeltes van het Nederlands continentaal plat moeten komen te staan.

De kerncentrale Borsele staat op de rol om in 2033 uitgefaseerd te worden. In de WLO-scenario's is de elektriciteitsproductie op basis van kernenergie klein verondersteld. Het huidige aandeel is gecontinueerd tot en met 2050 in alle scenario's. Met de continuering van het kleine aandeel houdt de WLO zich op de vlakte met betrekking tot keuzes rond kernenergie.

5.1.3 Warmtevoorziening

De verduurzaming van de warmtevoorziening vindt plaats in de sectoren gebouwde omgeving, landbouw en industrie.

De opgelegde warmtevraag bij nieuwbouwwoningen is erg laag als gevolg van de bouwvoorschriften. De warmtevoorziening in nieuwbouwwoningen is voor wat betreft de technologie in Laag vergelijkbaar met die in Hoog: grotendeels (> 60 procent) op basis van elektrische warmtepompen inclusief een deel met hybride vormen waarbij kleine gasketels worden ingezet om aan de piekvraag te voldoen. Minder dan 20 procent is puur op basis van HR-gasketels. De rest van de warmtevraag wordt geleverd door warmtenetten (restwarmte en geothermie).

De warmtevoorziening in bestaande woningen en utiliteitsgebouwen blijft naar verwachting deels bestaan uit HR gasketels. In Laag is ongeveer een kwart van de woningen overgegaan op een warmtenet of elektrische warmtepomp, in Hoog is dat circa 50 procent. Het aandeel zonneboilers (bij woningen) neemt toe, maar blijft met enkele procenten klein.

In de landbouw verschuift de warmtevoorziening in Laag van 2013 met vooral gas in warmtekracht installaties (WKK) naar 2050 ongeveer de helft en de rest is op basis van geothermie, warmte-koude opslag-installaties (WKO) en elektrische warmtepompen. In Hoog blijft er nog circa 30 procent WKK op gas en wordt bijna 40 procent van de warmtevoorziening via geothermie geregeld en 30 procent door WKO-installaties en elektrische warmtepompen.

In de industrie vindt er een verschuiving plaats tussen 2013 en 2050 van gasketels naar elektrische warmtepompen. In Hoog wordt met CCS een extra CO₂-reductie bereikt. De grote industriële productieprocessen van staal, kunstmest en grondstoffen voor plastics verschillen tussen Laag en Hoog met betrekking tot de uitstoot van CO₂ vooral door toepassing in Hoog van CCS en biomassa (grondstoffen plastics) en elektrificatie (bij kunstmestproductie).

5.1.4 Brandstoffenproductie

De productie van vloeibare brandstoffen blijft voor het overgrote deel op basis van fossiele energiedragers. In het scenario Laag is 10 procent van de geproduceerde brandstof op basis van biomassa en in Hoog 20 procent. CCS vindt alleen plaats bij de productie op basis van (vergassing) van biomassa in Hoog. De uitstoot van CO₂ als gevolg van het gebruik neemt alleen af door een afname van de vraag. Die neemt af als gevolg van elektrificatie van het wegverkeer en efficiencyverbetering bij verkeer en vervoer (zie paragraaf 4.3).

De productie van gas blijft gedomineerd worden (> 90 procent) door aardgas. In 2050 zal een klein deel van de gasproductie het gevolg zijn biomassa vergisting (enkele procenten) en biomassavergassing. In Hoog wordt bij de laatste technologie CCS toegepast. De inzet van waterstof als energiedrager wordt verondersteld pas zijn intrede te doen in de tweegraden-scenario's.

De vraag naar aardgas neemt overigens sterk 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

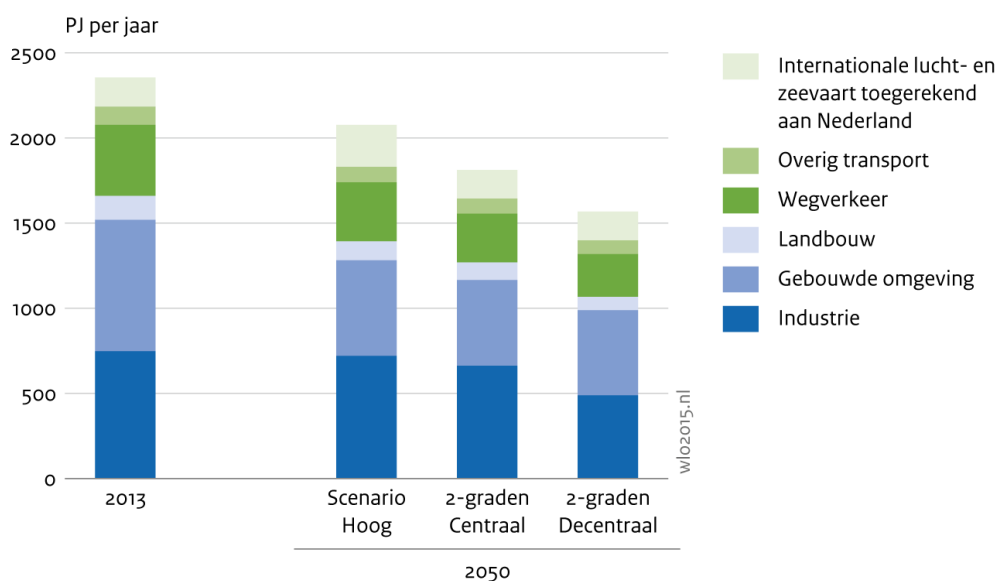
aardgas in principe kan worden voldaan. Er is expliciet geen onderscheid gemaakt tussen binnenlandse productie of import.

5.2 Tweegradenscenario's

De macro-economie (volumegroei) en bevolking van het scenario Hoog zijn de uitgangspunten bij de tweegradenscenario Centraal en Decentraal. Het vooropgestelde broeikasgas reductiedoel is echter 80 procent in plaats van 65 procent. Bij het zogenoemde tweegradenscenario Centraal ligt het accent in de energiemix op centrale energieopwekking, in het tweegradenscenario Decentraal is er een groter aandeel decentrale energieopwekking en ook op nog meer energie efficiency gedreven door lokale actoren en in de verschillende sectoren. Het binnenlandse finale energiegebruik daalt (Figuur 5.2 en Figuur 5.3) 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.

Figuur 5.2

Finaal energiegebruik per sector volgens WLO-scenario en aanvullende onzekerheidsverkenningen



Bron: PBL/CPB

De belangrijkste opgelegde verschillen tussen de tweegradenscenario's Centraal en Decentraal zijn:

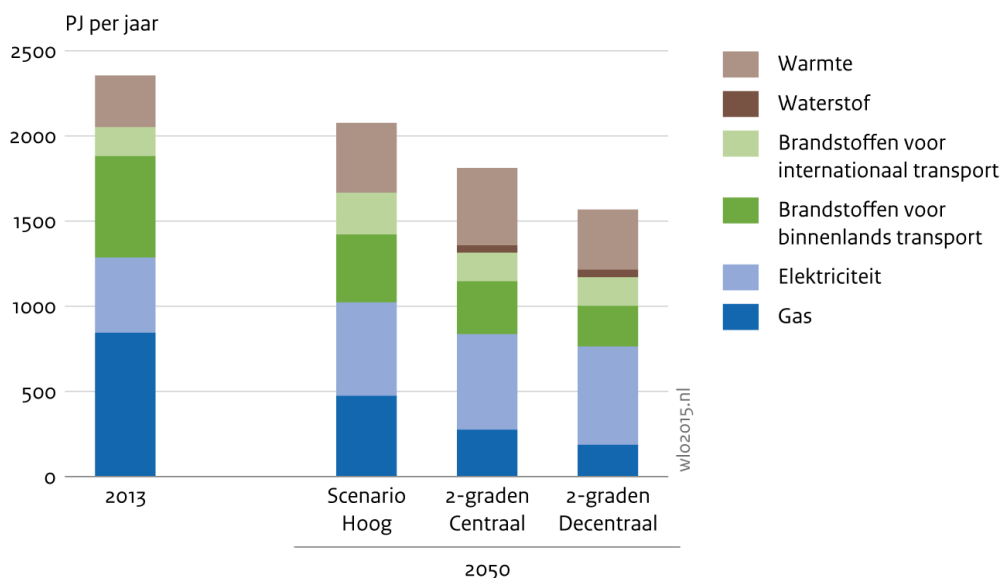
- er zijn meer windmolens op zee in het tweegradenscenario Centraal en meer windmolens op land in het tweegradenscenario Decentraal;
- er is minder zon-PV in het scenario Centraal dan in het scenario Decentraal;
- de hoeveelheid energie uit biomassa in combinatie met CCS is groter in het scenario Centraal 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.

Met deze verschillen in technologie kan bij een overwegend decentrale aanpak het reductiedoel van 80 procent alleen worden bereikt als de finale energievraag in 2050 ongeveer 15 procent lager is dan bij de overwegend centrale energievoorziening. Dat is nodig omdat er in Centraal veel meer CCS plaats vindt: in Centraal wordt ongeveer twee keer meer CO₂ afgevangen en opgeslagen dan in Decentraal. De extra afvang van ongeveer 25 Mton CO₂ in Centraal staat ongeveer 250 PJ meer finaal energieverbruik toe bij hetzelfde reductiedoel.

Figuur 5.3

Finaal energiegebruik per energiedrager volgens WLO-scenario en aanvullende onzekerheidsverkenningen



Bron: PBL/CPB

De verschillen in toepassing van energiedragers tussen Centraal en Decentraal (Figuur 5.3) betreffen meer gas, warmte (met name geothermie) en vloeibare transportbrandstoffen in Centraal en relatief minder elektriciteit in Centraal dan in Decentraal. Het relatief hoge elektriciteitsgebruik in Decentraal is het gevolg van de verregaande toepassing van elektrische warmtepompen bij de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving en landbouw. Bovendien is het personenverkeer nog verder geëlektrificeerd: 80 procent in Decentraal en 60 procent in Centraal.

Verdergaande energie efficiency voor de binnenlandse energievraag in Decentraal vindt plaats in alle sectoren. Bij de industrie is het verschil het grootst: in 2050 is ongeveer 25 procent minder energie in Decentraal verbruikt dan in Centraal. De energie mix in deze sector verschilt niet veel tussen Decentraal en Centraal afgezien van de mate van CCS toepassing.

5.2.1 Sectorontwikkeling tweegradenscenario's

De aanvullende onzekerheidsverkenningen op WLO Hoog, de tweegradenscenario's Centraal en Decentraal, hebben dezelfde macro-economie (volume-groei) en bevolking als het scenario Hoog. De finale energievraag is echter kleiner dan in het scenario Hoog door de aanname dat verdergaande energiebesparing plaats zal vinden. Ook vindt er een verdergaande vermindering plaats van de niet-CO₂ broeikasgassen ten opzichte van Hoog. Hieronder wordt de sectorontwikkeling gegeven van de tweegradenscenario's Centraal en Decentraal voor zover de cijfers afwijken van het scenario Hoog. Vergelijk hoofdstuk 4.2 tot en met 4.7.

De gebouwde omgeving In de gebouwde omgeving neemt de warmtevraag van woningen af tot 76 procent in Centraal en 60 procent in Decentraal ondanks de groei van het aantal woningen tot 121 procent in 2050 ten opzichte van 2013 (Tabel 5.1). De warmtevraag van de utiliteit neemt af tot 69 procent in Centraal en 60 procent in Decentraal ondanks de groei van de vloeroppervlakte tot 117 procent in 2050 ten opzichte van 2013. De afname van de warmtevraag is het gevolg van verdergaande energie efficiencyverbetering van bestaande gebouwen, sloop van energie-inefficiënte gebouwen en energie-efficiënte nieuwbouw (Tabel 5.2). In Decentraal is de toepassing van elektrische en hybride warmtepompen in de gebouwde omgeving ongeveer twee keer zo groot, terwijl in Centraal geothermie een veel grotere rol speelt bij de warmtevoorziening. Het elektriciteitsverbruik in de gebouwde omgeving, inclusief het gebruik voor de warmtepompen, is ongeveer 10 procent hoger in Decentraal dan Centraal. In de landbouw is een vergelijkbare verdeling tussen elektrische warmtepompen in Decentraal en geothermie in Centraal.

Tabel 5.1 Ontwikkeling van volume, warmtevraag per eenheid en warmtevraag van de gebouwde omgeving in de tweegradenscenario's.

	2013		2030		2050	
			Centraal	Decentraal	Centraal	Decentraal
Volume			Index 2013 = 100			
Woningen	7.3 ^a	miljoen woningen	113		121	
w.v. bestaand	7.3 ^a	miljoen woningen	91		81	
Utiliteit	381	miljoen m ² bvo ^b	109		117	
Warmtevraag per eenheid						
Woningen	48	gigajoule/woning	78	71	63	50
w.v. bestaand	48	gigajoule/woning	88	79	73	54
Utiliteit	0.45	gigajoule/m ² bvo ^b	78	74	59	51
Warmtevraag						
Woningen	345	petajoule	88	80	76	60
w.v. bestaand	345	petajoule	80	72	59	44
Utiliteit	170	petajoule	84	80	69	60
CO₂-uitstoot						
Gebouwde omgeving	31	Mton CO ₂	54	49	15	8

a) Cijfers conform CBS definitie tot 2012. De nieuwe CBS definitie gebruikt de Landelijke Voorziening Basisregistraties Adressen en Gebouwen (LV BAG). Op basis van die cijfers waren er in 2013 ca 3% meer woningen, 7.5 miljoen, dan volgens de oude definitie die hier is gebruikt.

b) bvo = brutovloeroppervlakte

Tabel 5.2 Ontwikkeling energie efficiencyverbetering van de gebouwde omgeving in de twee gradenscenario's.

			2013 - 2030		2013 - 2050	
			Centraal	Decentraal	Centraal	Decentraal
Energie efficiencyverbetering						
Woningen		Procent per jaar	1.5	2.0	1.3	1.9
w.v. bestaand		Procent per jaar	0.8	1.4	0.8	1.7
Utiliteit		Procent per jaar	1.5	1.8	1.4	1.8

Uitstoot CO₂ door het wegverkeer De uitstoot van CO₂ door het wegverkeer neemt verder af (tabel 5.3) in de twee gradenscenario's ten opzichte van het scenario Hoog (tabel 4.3) als gevolg van de aanname dat de elektrisch personenvervoer sneller zal groeien dan in Hoog (tabel 5.4). Het percentage bijmenging van biobrandstof is in de twee gradenscenario's ongewijzigd ten opzichte van Hoog.

Tabel 5.3 Ontwikkeling CO₂-uitstoot door wegverkeer en overig transport (megaton CO₂) in de twee gradenscenario's.

	2010*	2030		2050	
		Centraal	Decentraal	Centraal	Decentraal
Wegverkeer	34	24	21	13	10
Overige transport	5	6	5	5	5

* de gerealiseerde CO₂-uitstoot is berekend volgens de IPCC benadering, op basis van de afzet van motorbrandstoffen.

Tabel 5.4 Ontwikkeling elektrisch personenvervoer en bijmenging biobrandstoffen (procenten) in de twee gradenscenario's.

	2010	2030		2050	
		Centraal	Decentraal	Centraal	Decentraal
Elektrisch verreden kilometers*	0	10	20	40	55
Bijmenging biobrandstof	3	10	10	20	20

* schatting op basis van extra hybride, plug-in-hybride en vol-elektrische auto's in de twee gradenscenario's ten opzichte van de WLO scenario's Laag en Hoog.

Overig transport Het energiegebruik door 'overig transport' (tabel 5.5) neemt verder af als gevolg van een verhoogde energie efficiency deze vervoerssectoren. In 2050 is het verbruik lager ten opzichte van Hoog met 4 procent in Centraal en 12 procent in Decentraal. Het effect op de uitstoot van CO₂ door 'overig transport' is navenant, maar uit zich niet in de cijfers (tabel 5.3 en tabel 4.4) door afrondingen.

Tabel 5.5 Ontwikkeling vloeibare brandstof gebruik overig transport in de twee gradenscenario's.

	2010	2030		2050	
		Centraal	Decentraal	Centraal	Decentraal
		index 2010 = 100			
Overige transport	98	88	84	90	83

Internationale lucht- en zeevaart De volumegroei van de internationale lucht- en zeevaart is in de twee gradenscenario's identiek aan die in het scenario Hoog. Echter als gevolg veron-

derstelde energie efficiencyverbeteringen in deze transportsector in de tweegradenscenario's neemt het energiegebruik verder af ten opzichte van het scenario Hoog. Het energiegebruik door internationale lucht- en zeevaart is in beide tweegradenscenario's gelijk verondersteld. Het tempo waarin de groei naar 2050 gestalte krijgt is onzeker. Twee mogelijkheden zijn weergegeven voor 2030: of de groei blijft initieel achter en zet pas goed door na 2030 of de groei van internationaal transport start snel en neemt na 2030 langzamer toe (tabel 5.6).

Tabel 5.6 Het energiegebruik (petajoule) door de internationale lucht- en zeevaart toegerekend aan Nederland in de tweegradenscenario's.

	2013	2030	2050
		Centraal & Decentraal	Centraal & Decentraal
Internationale luchtvaart	84	69-96	96
Internationale zeevaart	103 ¹⁶	53-80	72

Industrie De volumegroei van de productie van staal, plasticgrondstoffen en kunstmest is in de tweegradenscenario's gelijk aan die in het scenario Hoog. De elektriciteitsvraag groeit net als in Hoog, maar minder snel als gevolg van de aanname dat er verdergaande energie efficiencyverbeteringen plaats zullen vinden in de tweegradenscenario's. De elektriciteitsvraag in de tweegradenscenario's is in 2050 lager dan in Hoog: 10 procent in Centraal en 20 procent in Decentraal. De warmtevraag in tweegraden Centraal en Decentraal is ook kleiner dan in scenario Hoog. De daling is echter minder sterk verondersteld dan bij de elektriciteitsvraag. De warmtevraag in de tweegradenscenario's is in 2050 lager dan in Hoog: ongeveer 5 procent in Centraal en 15 procent in Decentraal. Vergelijk de cijfers uit tabel 5.7 met die van tabel 4.10.

Tabel 5.7 De elektriciteitsvraag (teraWattuur) en warmtevraag (petajoule) in de industrie* in de tweegradenscenario's.

	2013	2030		2050	
		Centraal	Decentraal	Centraal	Decentraal
Elektriciteitsvraag	30	34	32	37	33
Warmtevraag_SHT	90	83	78	76	67
Warmtevraag_HT	95	88	83	81	71
Warmtevraag_LT	125	114	108	104	92

* exclusief de elektriciteits- en warmtevraag als gevolg van de productie van staal, plastic grondstoffen en kunstmest (zie tabel 4.11)

Landbouw De elektriciteitsvraag en restwarmtevraag in de land- en tuinbouw blijft in de tweegradenscenario's ongeveer gelijk aan die van het scenario Hoog. Het grootste deel van het energiegebruik, de warmtevraag door vooral de tuinbouw, is verondersteld verder af te nemen ten opzichte van Hoog, met 10 procent in Centraal en 25 procent in Decentraal.

Tabel 5.8 De warmtevraag (petajoule) in de land en tuinbouw in de tweegradenscenario's.

	2013	2030		2050	
		Centraal	Decentraal	Centraal	Decentraal
Warmtevraag	90	82	77	65	54

¹⁶ Voor 2013 vond ongeveer 17 procent van het energiegebruik door internationale zeevaart binnengaats plaats. Ongeveer 17 van de 103 petajoules aan 'Overig verkeer' toegekend. Dat onderscheid is alleen gemaakt voor 2013, niet voor de WLO scenario's in 2030 en 2050.

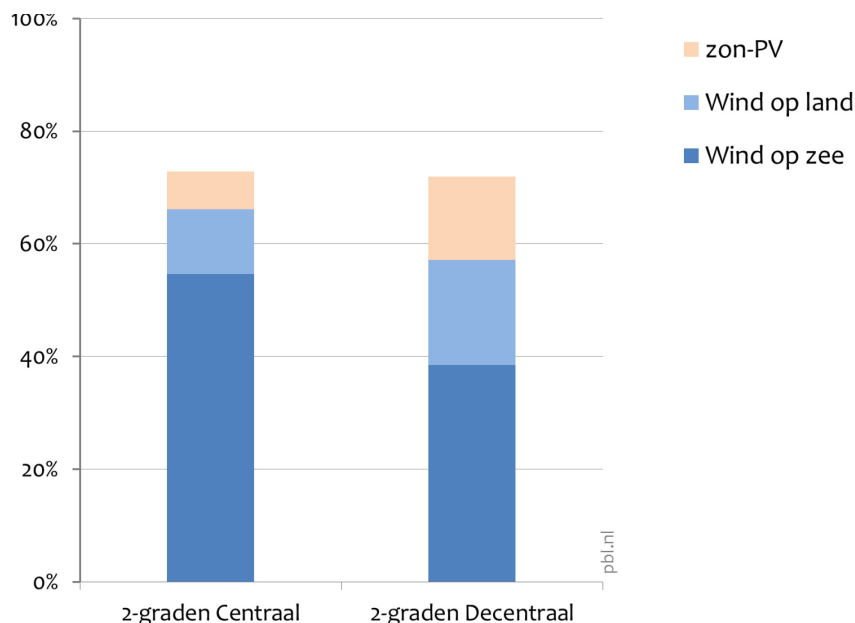
Niet-CO₂ broeikasgassen In de tweegradenscenario's is verondersteld dat de uitstoot van niet-CO₂ broeikasgassen in de landbouw nog verder kan worden verlaagd tot 13 megaton CO₂-eq in Centraal en 11 Mton CO₂-eq in Decentraal. Bij een veestapel die in grootte gelijk blijft aan die in het Hoog scenario is afvang van methaan in stallen een optie om de reductie van 1-3 Mton CO₂-eq te bewerkstelligen. De aanvullende onzekerheidsverkenningen voor het WLO thema Landbouw (WLO Landbouw 2015) laten zien dat in de variant 'burger aan zet' dat een deel van de methaan uitstootvermindering kan plaatsvinden zonder de genoemde afvangmaatregelen. Dat deel is echter beperkt tot 1 Mton CO₂-eq.

Tabel 5.9 Uitstoot niet-CO₂ broeikasgassen (in megaton CO₂-equivalenten) in de tweegradenscenario's.

	2013	2030		2050	
		Centraal	Decentraal	Centraal	Decentraal
Landbouw	18	16	15	13	11
Overige bronnen	11	7	7	4	4

Negatieve CO₂ uitstoot energieproductie De energieproductie (elektriciteit en vloeibare brandstoffen samen) kent in beide scenario's een negatieve uitstoot van enkele Mton CO₂ door de toepassing van biomassa in combinatie met CCS. Bij de productie van elektriciteit wordt de uitstoot van CO₂ als gevolg van het gebruik van fossiele brandstoffen, gecompenseerd door de toepassing van biomassa met CCS. Overall is daarom de elektriciteitsvoorziening in beide tweegradenscenario's in 2050 CO₂ neutraal. Zowel in Centraal als Decentraal wordt de elektriciteitsvoorziening gedomineerd door wind en zon (Figuur 5.4). Het verschil tussen Centraal en Decentraal zit vooral in de verdeling over zon-PV, wind-op-land en wind-op-zee.

Figuur 5.4 Bijdrage aan de elektriciteitsproductie door zonnecellen en windmolens op land en windmolens op zee in de tweegradenscenario's Centraal en Decentraal.



Bron: PBL/CPB

Samenvattend: in het scenario tweegraden Decentraal kan een net zo grote broeikasgasreductie worden bereikt als bij de Centrale energievoorziening. Daarvoor is echter een lagere finale energievraag nodig dan in Centraal van ten minste 15 procent. Dit komt door de ver-

onderstelling dat in Decentraal de inzet van CCS veel kleiner is dan in Centraal (ongeveer de helft) waardoor de CO₂-reductie meer uit een vermindering van het energiegebruik moeten komen.

6 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.
- Bollen, J. & C. Brink (2012), *Air Pollution Policy in Europe: Quantifying the Interaction with Greenhouse Gases and Climate Change Policies*, CPB Discussion Paper 220.
- BP (2014) Statistical Review of World Energy 2014
- Brigida, M. (2014) The switching relationship between natural gas and crude oil prices, *Energy Economics* 43, 48–55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2014.01.014>
- DECC (2013) DECC Fossil Fuel Price Projections, Department of Energy & Climate Change, July 2013, URN 13D/170, www.gov.uk/decc
- Den Elzen, M.G.J. & P. Lucas (2005) The FAIR model: a tool to analyse environmental and costs implications of climate regimes. *Environmental Modeling and Assessment*, 10(2): 115-134.
- 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. [http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2014\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2014).pdf)
- EU (2014) Verordening (EU) Nr. 421/2014 van het Europees Parlement en de Raad tot wijziging van Richtlijn 2003/87/EG tot vaststelling van een regeling voor de handel in broeikasgasemissierechten binnen de Gemeenschap, met het oog op de tenuitvoerlegging tegen 2020 van een internationale overeenkomst die op emissies van de internationale luchtvaart wereldwijd één marktgebaseerde maatregel toepast. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0421&from=EN>
- Franza, L. (2014) Long term gas import contracts in Europe, Evolution in pricing mechanisms. CIEP paper 2014 | 08, www.clingendaelenergy.com/publications
- Hekkenberg, M. & M. Verdonk (2014), Nationale Energieverkenning 2014, Petten: Energieonderzoek Centrum Nederland. <http://www.pbl.nl/publicaties/nationale-energieverkenning-2014>
- ICAO (2013) <http://cfapp.icao.int/Environmental-Report-2013/>
- IEA (2009) Transport, Energy and CO₂. Moving toward sustainability. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/transport2009.pdf>
- 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. <http://www.iea.org/etp/etp2014/>
- IEA (2015) World Energy Outlook 2015, International Energy Agency, IEA publications ISBN: 978-92-64-24366-8, www.iea.org/books
- IIASA (2011) Shared Socioeconomic Pathways (SSP) database http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/Energy/SSP_Scenario_Database.html
- IMAGE Integrated Model to Assess the Global Environment. PBL themasite. http://themasites.pbl.nl/models/image/index.php/Welcome_to_IMAGE_3.0_Documentation

IMO (2014) 3rd GHG study,
<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Green-house-Gas-Studies-2014.aspx>

IPCC (2015), Fifth Assessment Reports (AR5) <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>.

Knopf, B. et al. (2013), 'Beyond 2020 – Strategies and Costs for Transforming the European Energy System', *Climate Change Economics* 4, Supp. 01.

MNP (2001) The Targets Image Energy Regional (TIMER) model, Milieu en Natuurplanbureau, RIVM report 461502024.

<http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/461502024.pdf>

MNP (2007) Exploring European countries' emission reduction targets, abatement costs and measures needed under the 2007 EU reduction objectives, MNP report 500114009/2007.

<http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/500114009.pdf>

O'Neill, Brian C., Elmar Kriegler, Keywan Riahi, Kristie L. Ebi, Stephane Hallegatte, Timothy R. Carter, Ritu Mathur en Detlef P. van Vuuren (2014) A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways, *Climatic Change* 122:387–400, DOI 10.1007/s10584-013-0905-2.

PBL (2012), *Vesta ruimtelijk energiemodel voor de gebouwde omgeving*, Den Haag: PBL,
<http://www.pbl.nl/publicaties/2012/vesta-ruimtelijk-energiemodel-voor-de-gebouwde-omgeving>

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>

KNMI & PBL (2015), *Klimaatverandering. Samenvatting van het vijfde IPCC-assessment en een vertaling naar Nederland*, Den Haag/De Bilt: PBL/KNMI.

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. (2012) A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities, *Global Environmental Change*, Volume 22, Issue 1, February 2012, Pages 21–35

Vuuren, D. van et al. (2016), *Energy, 'Land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm'*, submitted.

WLO Demografie (2015), *Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Cahier Demografie*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving/Centraal Planbureau

<http://www.wlo2015.nl/rapporten-wlo/demografie>

WLO Klimaat en energie (2015), *Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Cahier Klimaat en energie*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving/Centraal Planbureau

<http://www.wlo2015.nl/rapporten-wlo/klimaat-en-energie>

WLO Landbouw (2015), *Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Cahier Landbouw*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving/Centraal Planbureau

<http://www.wlo2015.nl/rapporten-wlo/landbouw>

WLO Macro-economie (2015), *Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Cahier Macro-economie*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving/Centraal Planbureau

<http://www.wlo2015.nl/rapporten-wlo/macro-economie>

WLO Mobiliteit (2015), Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Cahier Mobiliteit, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving/Centraal Planbureau
<http://www.wlo2015.nl/rapporten-wlo/mobiliteit>

WLO Regionale ontwikkelingen en verstedelijking (2015), Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Cahier Regionale ontwikkelingen e verstedelijking, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving/Centraal Planbureau <http://www.wlo2015.nl/rapporten-wlo/regionale-ontwikkelingen-en-verstedelijking>

Annex 1

Tabel met gegevens over energievraag, volumeontwikkeling en niet-CO₂ broeikasgasuitstoot voor (deel)sectoren in het basisjaar 2013 en in de zichtjaren 2030 en 2050 voor de WLO scenario's Laag, Hoog en de twee aanvullende onzekerheidsverkenningen, de zogenoemde tweegradenscenario's centraal en decentraal. N.B. De cijfers bij het nationaal verkeer en vervoer in de tekst zijn voor het basisjaar 2010 om ze te laten aansluiten bij die van de module mobiliteit. Hieronder zijn ze voor het basisjaar 2013 gegeven.

Sector	Sectoronderdeel	eenheid	basisjaar	2030				2050			
				Laag	Hoog	2-graden centraal	2-graden decentraal	Laag	Hoog	2-graden centraal	2-graden decentraal
Gebouwde omgeving	Bestaande woningen	PJ warmte	345	320	289	275	248	294	232	205	151
	Woningen nieuwbouw	PJ warmte	0	3	29	29	29	6	57	57	57
	Utiliteitsbouw (HDO)	PJ warmte	170	160	144	144	136	149	117	117	102
	Elektriciteitsvraag huishoudens	TWh	24	23	27	27	27	22	31	31	31
	Elektriciteitsvraag HDO	TWh	37	26	30	30	30	16	23	23	23
Verkeer en vervoer	Personenauto's	miljard km	102	112	129	129	129	121	150	150	150
	Bestelauto's	miljard km	17	18	20	20	20	19	22	22	22
	Zwaar vrachtverkeer	miljard km	7	7	8	8	8	8	9	9	9
	Overig transport	PJ brandstof	100	83	88	86	83	80	92	89	81
	Internationale luchtvaart (NL)	PJ brandstof	84	93	97	69	69	125	133	96	96
	Internationale zeevaart (NL)	PJ brandstof	86	85	83	53	53	96	112	72	72
	Elektrisch (rail)vervoer	TWh	1.9	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.2	2.2	2.2
Industrie	Elektriciteitsvraag	TWh	30	33	36	34	32	35	41	37	33
	Warmtevraag SHT	PJ	90	80	85	83	78	70	80	76	67
	Warmtevraag HT	PJ	95	85	90	88	83	75	86	81	71
	Warmtevraag LT	PJ	125	113	117	114	108	100	110	104	92
	Productie staal	Mton staal	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	Productie kunstmest (ammoniak)	Mton NH ₃	1.7	1.7	1.9	1.9	1.9	1.7	2.0	2.0	2.0
	Productie grondstof plastics	Mton plastic	4.0	4.0	4.3	4.3	4.3	4.0	4.5	4.5	4.5
Landbouw	Elektriciteitsvraag	TWh	7.0	5.8	6.0	6.0	6.0	4.7	5.0	5.0	5.0
	Warmtevraag LT	PJ	90.0	75	77	74.2	69.3	59.9	64.8	58.3	48.6
	Restwarmte	PJ	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	6.5	6.5	6.5
Overige	Afval voor verbranding	PJ	16	16	16	16	16	15	15	15	15
	Niet-CO ₂ bkg Landbouw	Mton CO ₂ -eq	18	17	16	16	15	16	14	13	11
	Niet-CO ₂ bkg andere bronnen*	Mton CO ₂ -eq	11	7	5	5	5	5	3	3	3

HDO = Handel Diensten en Overheid, NL = Nederland, SHT = Super Hoge Temperatuur, HT = Hoge Temperatuur, LT = Lage temperatuur, bkg = broeikasgassen, PJ = petajoule, TWh = tera Wattuur, Mton = megaton, CO₂-eq. = CO₂-equivalent. * exclusief een klein deel van 1 à 2 Mton CO₂-eq dat vrij komt bij het gebruik van energie (vergelijk met tabel 4.13).

