

Naar een duurzame energievoorziening in onzekere tijden

Pieter Boot

Nederland streeft naar een duurzame energievoorziening in 2050. Deze bijdrage gaat in op de belangrijkste onzekerheden die uit verschillende scenario's en modelstudies naar voren komen. Ook in 2040 gebruiken we nog veel fossiele energie. Het aandeel hernieuwbare energie is toegenomen, de ontwikkeling van aardgas is onzeker. De Europese energie- en koolstofintensiteit moet driemaal sneller omlaag dan tot nu toe het geval is. Tot 2030 zijn relatief goedkope opties nog grotendeels toereikend, daarna zijn duurder nodig. Een robuuste Nederlandse aanpak volgt de Europese afspraken voor 2030, maar zet daarnaast sterk in op innovatie en met name demonstratieprojecten. Dat lukt alleen in een systeembenadering waarin wordt geredeneerd vanuit comparatieve voor- en nadelen. Omdat het beleid zelf een van de grootste onzekerheden is geworden, ligt een vorm van wetgeving over realisatie van langetermijndoelen voor de hand.

1 Inleiding

Nederland heeft zich voorgenomen in 2050 een duurzame energievoorziening te hebben. Wat dat precies is, is niet nader omschreven. Er is ook te veel onzeker om dat in een blauwdruk vast te leggen. Maar als het beleid zelf een grote onzekerheid is geworden, klinkt de roep om een 'stip aan de horizon' begrijpelijkerwijs luid. Zonder een globale schets van wat je wilt bereiken, zal een ingrijpende transitie niet lukken.

Doel van dit artikel is te schetsen hoe we zinvol met de onzekerheid van gebeurtenissen om ons heen kunnen omgaan, welke stip aan de horizon daarbij passend is en welk 'adaptief energiebeleid' denkbaar zou zijn in deze spanning tussen richting willen geven en onzekerheid.

We schetsen daartoe eerst de belangrijkste onzekerheden. Daarna geven we aan welke scenario's gehanteerd kunnen worden om toch een zinvol beeld te krijgen van mogelijke ontwikkelingen. Hieruit leiden we af wat meer en minder robuuste opties zijn en schetsen vervolgens de aspecten waarmee het beleid rekening zou moeten houden. De focus van het artikel is Nederland, maar veel cijfers en illustraties gaan over Europa omdat de Nederlandse ontwikkeling daarvan niet los te zien is.

2 Onzekerheden

Drie factoren hebben volgens vertegenwoordigers van energiebedrijven een grote invloed op het Europese energiesysteem en zijn zeer onzeker: de energieprijzen, de ontwikkelingen in Rusland en de vraag welk klimaatbeleid wordt gevoerd (WEC 2014). De onzekerheid die het beleid zelf veroorzaakt, is de laatste jaren toegenomen (Energy Post 2014) en geldt in Nederland wellicht nog meer dan in omliggende landen. Landen als het Verenigd Koninkrijk, Denemarken en Duitsland hebben zich langetermijndoelen gesteld. Als deze in de maatschappij als geloofwaardig overkomen – bijvoorbeeld omdat ze wettelijk zijn vastgelegd en een grote parlementaire en maatschappelijke meerderheid ze steunt – geeft dat investeerders voldoende zekerheid dat ze kunnen investeren op een wijze die bijdraagt aan het doelbereik.¹ Het is niet zo dat deze omliggende landen alleen op inzet op klimaatverandering hoger scoren. In een recent overzicht van de waardering van energiebeleid door investeerders wordt dit gerangschikt op voorzieningszekerheid, kosten en milieu. Nederland scoort op nummer 14, na Zwitserland, het Verenigd Koninkrijk, Denemarken, Frankrijk en Duitsland, maar voor België (WEC, 2014a). Jos Notenboom geeft in zijn bijdrage aan dit nummer aan hoe het beleid in deze landen is vorm gegeven.

Laten we eens veronderstellen dat Nederland de Europese afspraken voor 2030 als hard doel accepteert.² Dat heeft drie implicaties. De eerste is dat er een nationaal doel komt om in 2030 een bepaalde reductie van broeikasgasemissies buiten de ETS-sector (dus in het transport, de gebouwde omgeving en landbouw) te realiseren. De omvang daarvan is nog niet helemaal duidelijk en zal in Europa nader worden bepaald. Een reductie van 33 tot 40 procent voor de periode 2021-2030 ten opzichte van 2005 ligt in de lijn der verwachting (Ros en Daniels 2015). De tweede is dat Nederland een bijdrage zal moeten leveren aan de voor Europa afgesproken doelen inzake hernieuwbare energie en energiebesparing. Hoeveel dat precies is, hangt uiteraard af van wat Nederland voor de lange termijn zelf zinvol vindt en hoe Europa afsprekt dat landen dit moeten aanpakken – het beloofde nieuwe ‘*governance model*’. Hier is dus vooral nog van enige speelruimte sprake. De derde is dat Nederland zich ook een beeld moet vormen van wat er in de ETS-

¹ Omdat kapitaalkosten steeds zwaarder wegen in de energievoorziening, worden deze steeds belangrijker en daarmee het belang van een stabiele omgeving. De kosten van door zon opgewekte elektriciteit (zon-PV) zijn bijvoorbeeld 30 procent hoger bij kapitaalkosten (WACC) van 10 procent in plaats van 5 procent (IEA 2014a).

² Korthedshalve zijn de voorbeelden vooral gerelateerd aan klimaatbeleid. De importafhankelijkheid loopt daar in grote mate gelijk mee op. Bij voortzetten van het huidige klimaatbeleid zou de Europese importafhankelijkheid in 2040 licht toenemen; bij meer besparing, hernieuwbare energie en kernenergie zou deze aanmerkelijk verbeteren. Bij gegeven veronderstellingen over energieprijzen zal de Europese energie-importrekening in een klimaatscenario in 2020 bijna 9 procent en in 2040 bijna 50 procent lager zijn dan in het standaardscenario (IEA 2014b). Energie (incl. transportbrandstof) vormt bijna 8 procent van de huishouduitgaven in de Europese Unie. Inclusief investeringen in besparing en zon-PV daalt dat in het standaardscenario van het IEA naar 7 procent in 2020 en 5 procent in 2040, vooral door toenemende inkomens.

sector (elektriciteitsproductie en grote industrie) gaat gebeuren. De doelstelling daarvan is weliswaar Europees vastgelegd, maar de brandstofmix is primair een nationale aangelegenheid. ‘De markt’ zal niet bepalen of er in ons land kerncentrales of windmolens komen. Daarvoor zal een maatschappelijk gedragen overheidsvisie nodig zijn en beleidsinstrumenten die ervoor zorgen dat geïnvesteerd kan worden. Zonder zo’n visie zouden ook de netbedrijven niet weten hoe zij hun rol moeten invullen.

Tot 2030 zijn doelen dus wel vrij precies te bepalen. Dat blijkt ook uit langetermijnsenario’s. Deze laten zien dat er tot 2050 enorme verschillen in de toekomstbeelden zijn, maar dat die tot 2030 wel meevallen. De kosten van een tot 2030 enigszins verkeerdt geformuleerde toekomstvisie kunnen binnen de gegevenheden van het Europese raamwerk dus wel meevallen. Dat ligt anders voor 2050. Ook Europa heeft daar geen hard doel voor afgesproken, alleen ambities bepaald. Het beleid in grote andere regio’s is nog onhelder. We weten ook echt niet hoe na 2030 kosten van verschillende schone technologieën zich ontwikkelen en of prijzen van fossiele brandstoffen heel hoog of juist laag zullen zijn. We weten wel dat in innovatie geïnvesteerd moet worden, niet alleen in R&D, maar juist ook in de eerste fase van toepassing. De opbrengst daarvan en de ontwikkeling sindsdien kunnen dan de vervolgstappen bepalen.

3 Scenario’s

In de studie Welvaart en Leefomgeving (WLO 2015) die dit najaar verschijnt, werken het CPB en PBL met drie scenario’s. De eerste twee scenario’s worden in alle WLO-studies (macro-economie, demografie, ruimtelijke ontwikkeling etc.) gehanteerd. Deze zijn gestoeld op verschillende veronderstellingen rond technologische ontwikkeling en economische groei. In het ene scenario (HOOG) is de economische groei en technologische ontwikkeling hoog. Men kan dan denken aan een economisch groeipad van Nederland van 2 procent per jaar. Mondiaal wordt er goed samen gewerkt, er zijn geen grote geopolitieke spanningen en ook inzake klimaat worden er afspraken gemaakt. Hierbij passen betrekkelijk lage prijzen van fossiele brandstoffen – de technologie ontwikkelt zich immers voorspoedig en het klimaatbeleid zorgt voor een beperking van de vraag. In het andere scenario, LAAG, is het economische groeipad van Nederland structureel 1 procent per jaar, is de technologische ontwikkeling minder voorspoedig, zijn er wel geopolitieke spanningen en is er geen effectief mondiaal klimaatbeleid. De energievraag worden beperkt door de lage economische groei³, maar omdat dure marginale reserves moeten worden aangeboord en de geopolitieke spanningen een prijsverhogende invloed hebben, zijn de brandstofprijzen hoog. In geen van beide scenario’s wordt de mondiale ambitie om de temperatuurstijging tot 2 graden te

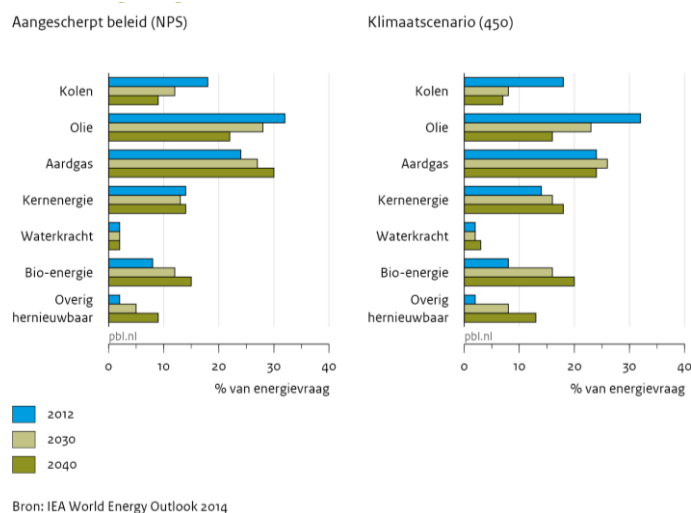
³ Mondiaal gaat 1 procentpunt hogere economische groei gepaard met een extra energievraag van 0,5 – 0,6 procent.

beperken gerealiseerd. Daarom wordt ook specifiek voor de energie- en klimaatmodule van de WLO een derde scenario ontworpen, waarin de 2 gradendoelstelling wel wordt gerealiseerd. Deze drie scenario's zijn nog niet uitgewerkt.

Het IEA werkt met drie scenario's (IEA 2014b). Voor de periode tot 2040 heten deze Current Policy, New Policies (NPS) en 450. Current Policy bouwt voort op al vastgesteld beleid en realiseert geen duurzaamheidsdoel. In het kader van dit artikel is dat dus minder relevant. New Policies is het standaardscenario, 450 beoogt de 2-gradendoelstelling te bereiken. In de op 2050 gerichte IEA studies heten de laatste scenario's 4DS en 2DS (IEA 2012, 2014). In dit artikel zal ik de uitkomsten van deze twee scenario's ter illustratie meenemen om te onderzoeken wat meer en minder robuuste opties zijn. Nu werkt het IEA met specifieke modellen – dat zijn verschillende voor de op 2040 en op 2050 gerichte studies. Om na te gaan hoe robuust opties zijn, is het dus ook goed te kijken naar specifieke studies die de robuustheid van modeluitkomsten onderzoeken. Dit soort studies wordt verricht in het *Energy Modeling Forum*. Voor Europa is daarover gerapporteerd in Knopf et al. (2013).

Figuur 1 geeft een beeld van de IEA scenario's met verdergaand beleid dan het huidige.

Figuur 1 Primaire energievraag in EU28



Een belangrijk verschil tussen de scenario's is dat de Europese energievraag in het klimaatscenario veel sneller, en voortdurend, daalt dan bij alleen aangescherpt beleid. In alle gevallen daalt het aandeel van kolen in de Europese brandstofmix. In het klimaatscenario niet zoveel sneller dan bij aangescherpt beleid, omdat daarin vanaf 2030 afvang en opslag van CO₂ (CCS) wordt verondersteld. De verschillende vormen van hernieuwbare energie nemen fors toe en de inzet van biomassa blijft

daarbij het omvangrijkst. Dat is dus vrij robuust⁴, maar tegelijk is een emissie-arm scenario niet hetzelfde als een hernieuwbaar. Mondiaal zal in het IEA klimaatscenario in 2050 nog steeds 40 procent van het energieverbruik fossiel zijn, met name in de industrie, het transport en de elektriciteitsvoorziening (IEA 2014). In het klimaatscenario van de Europese Commissie zou in 2050 39 procent van het Europese energieverbruik in de transportsector elektrisch opgewekt zijn, 36 procent uit olie en 25 procent uit biobrandstoffen bestaan (Europese Commissie 2011a). Andere studies geven vergelijkbare cijfers. Onzekerheid is er vooral over aardgas en kernenergie. Het aandeel aardgas stijgt aanzienlijk bij aangescherpt beleid, maar blijft constant – en daalt uiteindelijk – bij scherp klimaatbeleid. Dat is nog afgezien van onzekerheden over schaliegas, het gaat hier vooral om de vraag. Gas verdwijnt echter niet. Ook in een klimaatscenario met extra inzet van warmtepompen zou in de Europese gebouwde omgeving nog een kwart van de warmte in 2050 gasgestookt kunnen zijn (IEA 2014). Voor kernenergie geldt het omgekeerde. Als we alleen naar de elektriciteitssector zouden kijken, zijn deze onzekerheden minder geprononceerd en wordt het aandeel van hernieuwbare energie nog groter: mondiaal in het IEA klimaatscenario twee derde. Figuur 2 illustreert dit voor Europa.

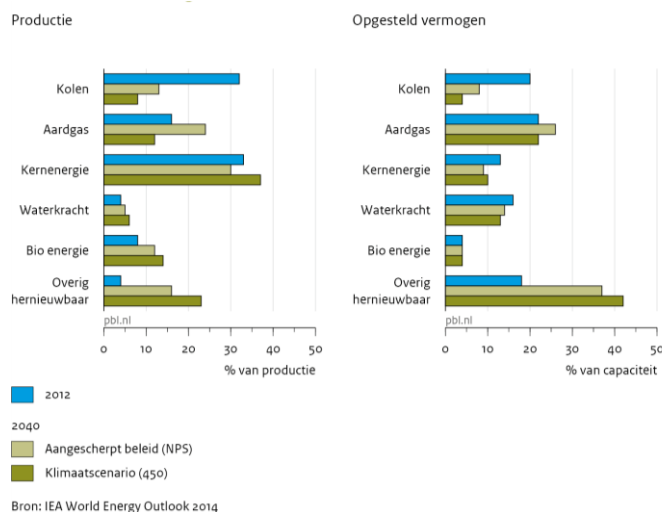
Zichtbaar is de veranderende rol van gascentrales: ze moeten er wel zijn, maar produceren vooral als het niet waait of de zon niet schijnt. Dat maakt ze duurder.⁵ Kerncentrales, kolencentrales (met CCS) en biomassa-centrales draaien relatief meer. Windturbines leveren gemiddeld 35-40 procent van hun capaciteit, door zon opgewekte elektriciteit (zon-PV) op de beste plekken 10-15 procent. De verschillen in de aanwezige capaciteit in 2040 van de twee scenario's zijn niet zo groot, die van de draaiuren – en daarmee de rentabiliteit – groter.

We kunnen ook kijken naar de sectoren waar de emissiereductie plaatsvindt en de jaren tot 2040 doortrekken. In de periode tot 2050 wordt het verschil tussen aangescherpt beleid (resultierend in globaal 4 graden temperatuurstijging) en het klimaatscenario (gericht op 2 graden temperatuurstijging) in Europa voor 30 procent veroorzaakt door een schonere elektriciteitssector, voor 26 procent door zuiniger en schoner vervoer, voor 18 procent door zuiniger gebouwen en voor 15 procent door de industrie (IEA, ETP 2012). Ongeveer twee vijfde van de reductie komt door efficiencyverbetering en een kwart door hernieuwbare energie. Ook andere studies wijzen op het grote aandeel van de elektriciteitssector in de reducties (Europese Commissie 2011).⁶

⁴ Niet voor niets melden besluitvormers in de energiesector weinig onzekerheid over de voortgang van hernieuwbare energie en energiebesparing en zeggen ze dat deze een grote invloed op hun handelen zullen hebben (WEC 2014).

⁵ Een huidige gascentrale wordt per eenheid productie ongeveer de helft duurder als de capaciteitsfactor terugloopt van 90 naar 30 procent (IEA 2014).

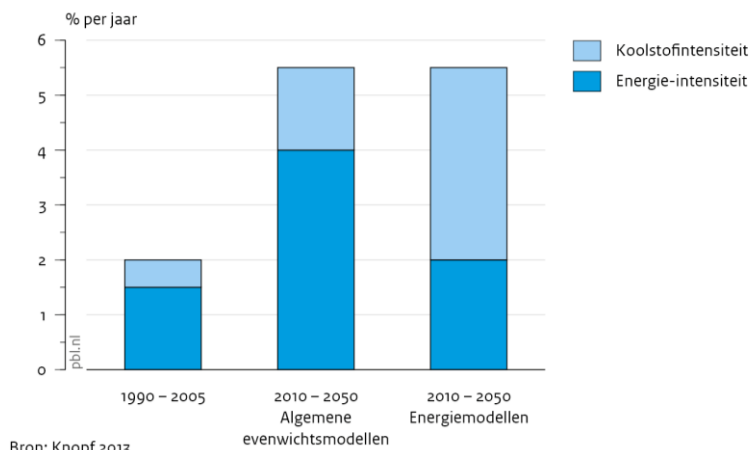
⁶ Tot 2030 kan ook de bijdrage van niet-CO₂-broeikasgassen, zoals methaan in de landbouw, nog sterk omlaag.

Figuur 2 Elektriciteitsvoorziening in EU28

Nu kan men stellen dat deze inzichten maar de uitkomst van een modelanalyse zijn en dat verschillende modellen andere inzichten bieden. Dat is juist. Om te zien hoe robuust de inzichten werkelijk zijn, worden in het Energy Modeling Forum (EMF) uitkomsten van verschillende modelgroepen vergeleken. Daarbij zijn er grosso modo twee typen modellen: de algemeen evenwichts-economische modellen en de gedetailleerder energiemodellen waarin terugkoppelingen naar de economie minder een rol spelen. Om 80 procent reductie van broeikasgasemissies in 2050 te bereiken, voorzien de modellen een afname van de koolstofintensiteit van de economie die geleidelijk oploopt: van recent 2 procent per jaar nu naar 2,2 procent in 2010-30 en 6 procent in 2030-50.⁷ De modellen van de eerste groep hebben een grotere daling van de energie-intensiteit nodig en laten het resterende energieverbruik iets minder snel schoon worden. Bij de energiemodellen is dat andersom. Maar in alle gevallen gaat het om aanzienlijke verschillen ten opzichte van wat we het laatste decennium in Europa hebben gerealiseerd (figuur 3).

⁷ De koolstofintensiteit daalt door de inzet van kolen in plaats van gas, door hernieuwbare energie of kernenergie, en door CCS. Ook in bijvoorbeeld de Impact Assessment van de Europese Commissie is het energieverbruik in 2050 30-40 procent minder dan nu (Europese Commissie 2011).

Figuur 3 Noodzakelijke afname van energie-intensiteit en koolstofintensiteit om 80 procent reductie van broeikasgasemissies te realiseren



In de overzichtsstudie van Knopf et al. (2013) worden de volgende conclusies uit de modelvergelijking getrokken.

- Tot 2030 zijn de verschillen niet groot, met name niet in de elektriciteitssector en niet tussen de gematigde en strenge klimaatscenario's. Na 2030 nemen alle verschillen sterk toe. Het aandeel hernieuwbare energie neemt in klimaatscenario's bijvoorbeeld altijd toe maar kan – ook als CCS en kernenergie in de modellen niet verboden worden – zowel 40 procent als 60 procent van de brandstofmix bedragen.⁸
- Het aandeel van het elektriciteitsverbruik in de energievraag stijgt als de broeikasgasuitstoot omlaag moet. De elektriciteitssector kan het goedkoopst reduceren en zou dat als eerste in sterke mate moeten doen.⁹
- Tot 2030 kom je nog een heel eind met betrekkelijk goedkope opties. Daarna zijn steeds duurdere nodig. Het is dus belangrijk om naast broeikasgasreductie stevig innovatiebeleid te voeren om de kosten van latere reducties te verkleinen.
- Reducties in de transportsector zijn het duurst. Bij elkaar zijn de kosten als aandeel van het nationaal inkomen te overzien als andere grote landen en regio's meedoen aan klimaatbeleid. Als dat niet zo is, nemen de kosten van streng Europees klimaat sterk toe tot enkele procenten van het bruto nationaal product.
- Om 80 procent reductie van broeikasgasemissies in 2050 te bereiken heb je voor een kostenoptimaal Europees pad in 2020 rond 28 procent reductie nodig

⁸ In een andere modelvergelijking bleek dat het verschil in kosten van kernenergie de belangrijkste oorzaak van dit soort verschillen in modeluitkomsten is (Bosetti et al. 2015).

⁹ De koolstofintensiteit van de Europese elektriciteitssector daalt van 400 gram CO₂/kWh in 2011 naar 300 in 2020, 100 in 2030 en minder dan 50 in 2040 in het IEA klimaatscenario (IEA 2014). De Engelse *Committee on Climate Change* heeft voorgesteld deze koolstofintensiteit in het Verenigd Koninkrijk richtinggevend in het beleid te laten zijn.

en in 2030 rond de 47 procent. De officiële Europese doelen voor die jaren (-20 en -40 procent) zijn dus aan de lage kant en maken een wat sterkere reductie daarna nodig. Dat hoeft niet in strijd te zijn met ‘adaptief beleid’ waarin wordt ingespeeld op nieuwe ontwikkelingen en kansen, maar alleen als de periode daarna zorgvuldig wordt voorbereid en maximaal wordt ingezet op kostenreductie voor grootschalige toepassing in latere jaren.

- Het meest robuuste beleid is om tot 2030 een solide basis van broeikasgasreductie te leggen (daadwerkelijk inzetten op eerste stappen en kostenreductie) om daarna goedkoper de grote transitie te kunnen realiseren. Volledige inzet op energiebesparing in de eerste decennia is cruciaal, daarna kan zwaardere inzet op een lagere koolstofinzet volgen.

4 Keuzes

In scenario's worden vaak bepaalde opties uitgesloten, omdat de opdrachtgever van de studie die opties afkeurt, of om te onderzoeken of de gestelde doelen nog steeds haalbaar zijn. Dat spitst zich veelal toe op kernenergie en afvang en opslag van CO₂ (CCS). Uit de verschillende analyses zijn enkele lijnen te trekken. Zonder kernenergie is 80 procent broeikasgasreductie nog mogelijk, maar het wordt waarschijnlijk duurder. Zonder CCS is een beperking van de temperatuurstijging tot 2 graden of minder waarschijnlijk niet mogelijk. Dit heeft twee oorzaken. Allereerst komt het door de noodzaak om na 2050 *negatieve* emissies te realiseren. Het ‘koolstofbudget’ is in 2050 op als de emissies niet snel omlaag gaan (PBL en KNMI 2015). Dat kan je in theorie compenseren door de inzet van biomassa te combineren met CCS (bCCS): zo ontstaan negatieve emissies. Een tweede reden waarom CCS noodzakelijk zou zijn is dat er naast besparing op een gegeven moment in de zware industrie geen alternatieven zijn. Voor de elektriciteitssector kom je er zonder CCS nog wel uit, maar wordt het aandeel wind en zon wellicht zo groot dat de netten dit zonder aanvullende maatregelen gericht op flexibiliteit van het systeem niet aankunnen (HM Government 2010). Dat geldt uiteraard nog sterker als men zowel kernenergie als CCS zou uitsluiten.

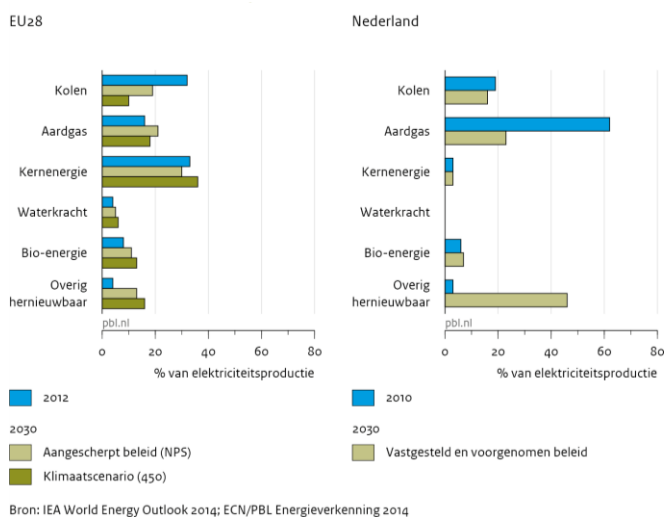
5 Nederland

De Nederlandse energievoorziening is veel eenzijdiger dan de Europese. Waar de twee brandstoffen met het grootste aandeel in Europa (olie en gas) in 2012 56 procent van het primair energieverbruik voor hun rekening namen, was dat in Nederland in 2010 83 procent. Kolen en kernenergie leverden in Europa samen 32 procent, in Nederland 11, en hernieuwbaar in Europa 12 tegen 4 procent in Nederland. Volgens de Nationale Energieverkenning zal in 2030 bij het huidig en voorgenomen beleid het aandeel olie gelijk zijn aan het huidige, maar is dat van aardgas sterk gedaald. Dat van kolen blijft globaal constant en van hernieuwbaar

stijgt sterk. De blijvende rol van kolen en sterke afname van het aandeel aardgas tot 2030 is dus een ander accent dan wat voor Europa wordt verwacht.

Opmerkelijk is dat voor Nederland (vastgesteld plus voorgenomen beleid) in de elektriciteitssector weliswaar een veel evenwichtiger brandstofmix wordt verwacht, maar dat deze zeer sterk van het Europees gemiddelde blijft afwijken (figuur 4).

Figuur 4 Brandstofmix voor elektriciteitsproductie



Bron: IEA World Energy Outlook 2014; ECN/PBL Energieverkenning 2014

Het Nederlandse gasaandeel daalt dramatisch, terwijl dat van windenergie, maar ook van zonne-energie veel sterker dan het Europese gemiddelde stijgt.¹⁰ Richting een koolstafarme elektriciteitsvoorziening is dat ook nodig, omdat er in Nederland nauwelijks van kernenergie gebruik gemaakt wordt. Waar de Europese productie iets daalt, stijgt deze in Nederland.

PBL en ECN (2011) zijn nagegaan welke opties voor Nederland niet gemist kunnen worden om 70 of 80 procent van de broeikasgasemissies te reduceren. Belangrijkste bouwstenen blijken absolute vermindering van de energievraag, inzet van biomassa, afvang en opslag van CO₂, en elektriciteitsproductie zonder CO₂-emissies in combinatie met een hoger aandeel elektriciteit in het energieverbruik (het maakt voor de sommen niet uit of dat door kernenergie, zonne- of windenergie wordt gerealiseerd).¹¹ Het niet inzetten van een van deze opties zou het uiterste vragen van de andere. In theorie is 70 procent reductie dan soms nog wel mogelijk, maar gezien de vele onzekerheden wordt dat bestempeld als een risicovolle strategie. Tachtig procent reductie is zonder toepassing van elk van deze opties eigenlijk niet mogelijk. Bij plausibele veronderstellingen zal een koolstofarm

¹⁰ Het Nederlandse aandeel zon- en windenergie is in 2030 al hoger dan wat de branchevereniging Eurelectric in haar klimaatscenario voor 2050 veronderstelt (Behrens et al. 2014).

¹¹ Deze vier elementen lijken heel robuust. De Engelse regering kwam tot dezelfde conclusies (HM Government 2010) en voegde hieraan toe dat reducties bij niet-CO₂-broeikasgassen, industriële processen en het internationale transport niet vergeten mogen worden.

energiesysteem duurder zijn dan het doortrekken van huidige trends. De gasvraag zal uiteindelijk bij stevig klimaatbeleid dalen, omdat op gas in de warmtevoorziening bespaard wordt en CCS meer kosteneffectief is bij kolenstook. Biomassa blijft vooralsnog de belangrijkste bron van hernieuwbare energie omdat het breder inzetbaar is dan alleen in de elektriciteitsvoorziening, wat aandacht voor de duurzaamheid ervan blijft vragen.

6 Beleid

Het streven naar een robuust duurzaam energiebeleid zou het volgende kunnen inhouden.

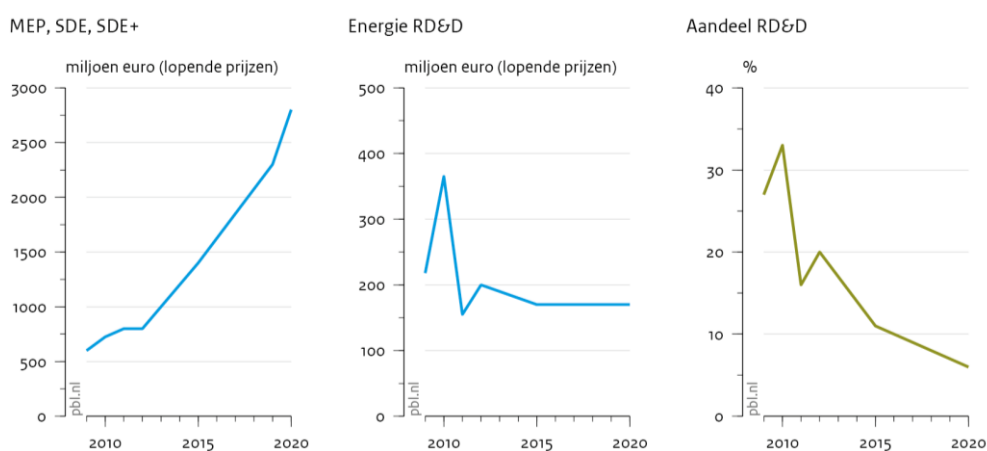
- Het kan inspelen op emissiereducties die beginnen met inzet op 2 graden temperatuurstijging. Dat kan door een reductiedoel van -80 procent broeikasgassen hard vast te leggen. Dit heeft ook baten inzake luchtkwaliteit en importafhankelijkheid en de kosten kunnen beperkt blijven. De harde vastlegging biedt de gewenste zekerheid voor investeerders. Tegelijk blijven we wel om ons heen kijken. Als gaandeweg blijkt dat andere regio's onvoldoende meedoen is rond 2030 terugval naar een lagere ambitie denkbaar, gezien de vanaf dat moment hoge kosten van het bereiken van een 2 gradendoel.
- Tot 2030 staan forse energiebesparing en het bereiken van een in sterke mate koolstofarme elektriciteitssector altijd voorop en is het nodig te bevorderen dat duurzame biomassa in forse omvang aanwezig is (zowel voor de chemie als voor het energieverbruik).
- Een sterke innovatie-inspanning is nodig om na 2030 tegen lagere kosten te kunnen implementeren. CCS hoort daarbij op grote schaal toepassingsgereed te zijn. Door onderzoek, ontwikkeling en vooral demonstraties (RD&D) creëer je als het ware opties die later in meer of mindere mate toegepast kunnen worden.
- De positie van gas is in de Europese energietransitie onzeker.

Het is in dit bestek onmogelijk een hierop gericht beleid in extenso te behandelen. Wel kunnen we enkele cruciale onderdelen aanstippen. Daarbij maak ik mede gebruik van cijfers uit de Nationale Energieverkenning 2014 om een indruk te geven van de ordegrotten van de uitdagingen waarvoor we staan.

1. *Innovatie.* Rond 2009 heeft Nederland resoluut beleid ingezet waarin de 'uitrol' van hernieuwbare energie en innovatie losgekoppeld zijn. Tot die tijd had de ondersteuning van hernieuwbare energie een dubbel doel: uitrol en innovatie bevorderen. Daarna is het vooral nog uitrol en een beetje innovatie via de Topsector Energie. Dat heeft een voor- en een nadeel. Het voordeel is dat de bevordering van hernieuwbare energie in Nederland relatief goedkoop is. De Europese toezichthouders hebben dat voor de elektriciteitssector vergeleken (CEER 2015). Na Denemarken (3,3 ct per gesubsidieerde kWh hernieuwbaar opgewekte elektriciteit) is de ondersteuning in Nederland vergeleken met ons omringende landen het goedkoopst, ver voor Duitsland

(14,2 ct) of België (15,6 ct; alle cijfers inclusief investeringssubsidie en fiscale faciliteiten). Maar het nadeel is dat ‘uitrol’ en stimulering van innovatie grotendeels zijn losgekoppeld.¹² Daarbij zullen de komende jaren de relatieve uitgaven voor energie-innovatie ten opzichte van uitrol van hernieuwbare energie sterk afnemen. Cijfers hierover zijn deels schattingen, maar ze geven wel een indruk. Figuur 5 vergelijkt de kasuitgaven voor de opeenvolgende ondersteuningsinstrumenten voor hernieuwbare energie (MEP, SDE en SDE+) met de uitgaven voor energie RD&D, waarbij ik veronderstel dat de laatste in de periode 2015-20 constant zullen blijven.¹³

Figuur 5 Kasuitgaven MEP, SDE en SDE+, en uitgaven voor energie RD&D (x)



Bron: IEA RD&D database; Algemene Rekenkamer, Subsidieregelingen duurzame energieproductie; EZ 2015; Londo en Boot, 2013.

(x) Excl. eerste geldstroom universiteiten (ongeveer 150 mln.), EIA, Vamil en invloed salderingsregeling zon-PV; SEO (2014) geeft voor RD&D lagere cijfers.

De planbureaus beargumenteerden onlangs dat de verhouding tussen ‘uitrol’ van hernieuwbare energie en innovatie-inspanning niet evenwichtig was, zonder daarbij overigens bovenstaande cijfers te geven (CPB e.a. 2014). Minister Kamp (EZ 2015) antwoordde daarop dat hij niet met geld kon schuiven omdat dit ten koste van het doelbereik van hernieuwbare energie in 2020/23 zou gaan en constateerde dat de planbureaus geen concreet voorstel voor een betere verhouding deden. Nu bieden wetenschappelijke analyses onvoldoende houvast voor algemene uitspraken over ‘optimale’ verhouding van kennisontwikkeling en –toepassing. Beide zijn uiteraard nodig. Toch zijn er indicaties dat op lange termijn een zwaardere inzet op onderzoek, ontwikkeling, demonstratie en eerste toepassing meer opleveren dan de huidige eenzijdige nadruk op *learning by*

¹² Er is 50 miljoen euro uit de SDE+ ter beschikking gesteld voor kostenverlaging van hernieuwbare energie. Onduidelijk is vooral aan welke lange termijnperspectief de RD&D gelden zijn gekoppeld.

¹³ De vergelijking is flatteus voor het aandeel RD&D, omdat de omvang daarvan betrekking heeft op de *totale* RD&D uitgaven. Die voor hernieuwbare energie zijn hiervan een kwart tot een derde.

doing zonder verschil tussen opties met en zonder potentieel voor de lange termijn (Verdonk en Boot 2011). De denktank Bruegel constateerde onlangs dat veel meer nagedacht moet worden over de optimale samenhang van deze investeringen (Zachman 2014). Een onbeargumenteerde verschuiving van het aandeel RD&D van rond de 30 naar rond de 6 procent in tien jaar is welhaast zeker niet verstandig. Met begrip voor het standpunt van minister Kamp dat tot 2020/23 het uitrolgeld nodig is om de doelen te halen, zou richtinggevend gesteld kunnen worden dat voor de periode daarna minimaal een vijfde van de totale uitgaven voor RD&D zinvol is om een effectieve en efficiënte bijdrage aan kostenverlaging van schone energie na 2030 te kunnen leveren en dat in de uitrol ook ruimte komt voor eerste toepassingen van kansrijke opties.¹⁴ In het Topsectorenbeleid kan dat gelijk een bijdrage leveren aan de concurrentiekracht van het Nederlandse bedrijfsleven. Zo'n grotere aandacht voor RD&D is alleen zinvol wanneer ook de toepassing ervan richting krijgt. Een voorbeeld zijn hybride warmtepompen. Deze zijn een schonere opvolger van de huidige HR-ketel. Door innovatie en toepassing worden ze goedkoper. Een evenwichtiger verhouding tussen belasting op gas en elektriciteit is van belang voor het stimuleren hiervan.

2. *Systeembenadering*. Energie is een systeem en transitie kan men alleen zinvol in een systeembenadering bezien. Elektrische auto's leveren bijvoorbeeld vooral een bijdrage aan een klimaatneutrale economie als de elektriciteitsproductie klimaatneutraal is. Bij biomassa moet bezien worden welke hoeveelheid zinvol hoogwaardig in de chemie ingezet kan worden voordat naar verbranding in de energievoorziening gekeken wordt. En dan gaan toepassingen waarvoor geen of weinig alternatief is – zoals voor de biobrandstof in de luchtvaart en het lange afstandstransport – voor degene waarvoor wel alternatieven zijn, zoals in de elektriciteitsvoorziening. Dit is bekend. De keerzijde hiervan is dat 'lock-ins' voorkomen moeten worden. Mogelijke voorbeelden daarvan zouden zijn gas in personenvervoer (want emitteert nog steeds CO₂ terwijl elektriciteit of waterstof alternatieven zijn) of kleinschalige wkk-installaties (restwarmte en warmtepompen zijn in gebouwen alternatieven). Minder aandacht is er voor de samenhang tussen investeringen in productie, opslag, verbruik en transportnetten – de infrastructuur. In het huidige energiebeleid volgt de infrastructuur de productie en het verbruik. Dat was begrijpelijk toen de kosten voor met name elektriciteitsproductie veel hoger waren dan voor de netten, en toen er niet zoveel te kiezen viel: of er nu een gas- of kolencentrale gebouwd wordt, maakt voor de netten niet zoveel uit. Dit is voorbij. Netten zijn duurder geworden en er is grote onzekerheid of het energiesysteem van de toekomst net zo centraal georiënteerd zal zijn als het huidige.

¹⁴ We raken hier aan de politieke discussie over de inzet van publieke middelen. Men kan ook stellen dat *zowel* uitrol als RD&D zinvol zijn, te meer in zoverre ze bijdragen aan economische groei. De genoemde 20 procent correspondeert ruwweg met de stelling van het IEA dat voor een succesvolle mondiale energietransitie de uitgaven voor RD&D moeten verdrievoudigen (IEA 2015).

Dat hangt vooral af van de te verwachten ontwikkeling van zonne-energie in de elektriciteitsvoorziening. Deze lijkt zeer onzeker.¹⁵ In de visie van de planbureaus in de Monitor Duurzaam Nederland 2014 speelt zon-PV geen rol in een kostenoptimale Europese energiemix in 2050, omdat het moment van productie ervan niet aansluit bij de vraag: de hoogste elektriciteitsvraag in Noordwest-Europa is 's avonds in de winter, de hoogste productie overdag in de zomer: de *'capacity credit'* van zon-PV in Noordwest Europa is vrijwel nul. Op de achtergrond speelt dan de vraag wat de relatieve kosten van zon-PV kunnen worden (bijvoorbeeld in relatie tot wind op zee of kernenergie) en vooral hoeveel opslag van overtollige elektriciteit mogelijk is.¹⁶ Zeker is dat de kosten van zon-PV veel sneller dalen dan voor mogelijk werd gehouden. Het IEA (2014a) voorzag in 2014 dat in 2050 16 procent van de mondiale elektriciteitsproductie door de zon geleverd zou worden, terwijl dat in 2011 nog maar 11 procent was. Maar ook deze analyse van het IEA voorziet voor Europa een lager aandeel zonne-elektriciteit dan mondiaal, juist door het vraagpatroon. Zelfs in een scenario met nadruk op hernieuwbare energie zou het aandeel zon-PV in de Europese elektriciteitsvoorziening in 2050 maar 7,5 procent zijn, tegen bijvoorbeeld 18 procent in de Verenigde Staten (door vraag naar airconditioning gelijktijdig met de elektriciteitsproductie) en tegen 35 procent door wind opgewekte elektriciteit in Europa.¹⁷ Nu is er een wereld te winnen door een flexibeler elektriciteitssysteem (zie de bijdrage van Koutstaal in dit nummer) en zal opslag (primair naar warmte en koude) makkelijker en goedkoper worden. Maar opslag van energie die in de zomer is geproduceerd naar verbruik in de winter zal vermoedelijk moeilijk en kostbaar blijven. Ook is niet alle zonne-energie kleinschalig. Mondiaal wordt verwacht dat de helft van de zonne-energie grootschalig zal zijn. Ook in Nederland zien we dat grootschalige zon-PV al een beroep doet op de SDE+.

3. *Comparatieve voor- en nadelen.* Bij het nadenken over een duurzame energievoorziening is het goed ook te bezien waar Nederland meer en minder voordelen heeft. Drie aspecten vallen dan op. Allereerst hebben we weinig ruimte. We zijn een dichtbevolkt land. Het ligt niet voor de hand dat we ons gaan specialiseren in energie-opties die veel ruimte kosten. Daarmee vallen nadruk op zon-PV, biomassaproductie en wind op land af. Dit betekent niet dat daar niets zou kunnen, maar het ligt niet voor de hand hier hogere aandelen te wensen dan het Europese gemiddelde. Energiebesparing, flexibele netten en wellicht kernenergie passen juist meer dan gemiddeld omdat zij baat hebben bij grote dichtheden resp. weinig ruimte nodig hebben. Wind op zee wordt in

¹⁵ Modellen lijken zich met zon-PV geen raad te weten. Er is de laatste jaren veel meer capaciteit bijgekomen dan aanvankelijk verwacht. Het IEA model verwacht nu dat de jaarlijkse toename van zon-PV zal afnemen (van 38GW in 2013 naar 29 GW in 2020), in Europa zelfs van 22 GW in 2011 naar 5 GW in 2020) (IEA 2014b). In een van de recente Shell-scenario's is zonne-energie vanaf 2060 echter de grootste energiebron (Shell 2013).

¹⁶ Niet voor niets geldt de kostenontwikkeling van elektriciteitsopslag naast de gang van zaken in Rusland in Duitsland als belangrijkste onzekerheid met groot effect (WEC 2014).

¹⁷ Hiernaast is er *Concentrated Solar Power*, maar het verwachte aandeel daarvan in Europa is nog lager.

klimaatscenario's met nadruk in het Verenigd Koninkrijk, Denemarken en Nederland geplaatst (Simoës et al 2013), maar het is wel riskant vooral op één optie in te zetten. Overslag van olie, biomassa en (het minder robuuste) LNG passen in de grote havens. Ten tweede zal bij een aandeel van fossiele brandstoffen nog in 2040 en waarschijnlijk ook lang daarna in de brandstofmix veel afvang en opslag van CCS nodig zijn. Als we ons daarop voorbereiden hebben we hier een goede positie. Een voormalig CEO van EOn Benelux zei niet voor niets dat de Maasvlakte de beste plaats in Europa is voor kolencentrales: mogelijk gebruik van restwarmte, koelwater en opslagcapaciteit van CO₂ onder zee. Daar maken we echter alleen gebruik van als we dat tijdig voorbereiden. Ten derde hebben we een meer of minder goede kennispositie in verschillende opties en is de ligging in Noordwest-Europa een gegeven. In het kader van de Topsector Energie is nagedacht over sterktes in kennis en exportkansen, maar deze zijn niet gerelateerd aan een visie van wat we nu in Nederland op lange termijn zelf willen. Dit is een aspect dat aan de huidige overwegingen toegevoegd moet worden. In veel opzichten is het Nederlandse bedrijfsleven toeleverancier van Duitsland. Ook onze energienetten zijn daarmee verbonden. Het is dus belangrijk om ook te weten wat de voornemens in Duitsland zijn (zie de bijdrage van Notenboom en Ybema).

4. *Regionale verscheidenheid.* Zoals het Nederlandse beleid samenhangt met het Europese, wordt de regionale kant van het energiesysteem en –beleid belangrijker. In regio's met een groot warmteaanbod kan over warmtenetten nagedacht worden, in nieuwbouwwijken is geen gasnet meer nodig, in Zeeland heeft men een voorkeur voor kernenergie, maar in de Achterhoek voor decentrale energie. Deze voorkeuren kunnen ook veranderen: Groningen was tien jaar geleden vooral trots op de gasproductie en de kennis die daarom heen opgebouwd is, nu is er vooral zorg. Regio en land zullen steeds meer in samenspraak tot oplossingen moeten komen. De kracht van de 'energieke samenleving' kan daarbij een belangrijke rol spelen, maar als het proces onhandig wordt aangepakt – nationaal beleid dat verzint wat in een bepaalde regio absoluut noodzakelijk is – juist ook blokkerend werken. Misschien past deze regionale variëteit ook wel in de onzekerheid binnen de energiesector of het aandeel decentrale systemen nu wel of niet substantieel zal toenemen (WEC 2014).
5. *Beleidsinstrumenten.* Hier lijken drie vragen relevant. Indien we veronderstellen dat een transitie van de elektriciteitssector al voor 2030 onderweg moet zijn, en dat de Europese CO₂-prijs tot dat moment onvoldoende prikkels zal geven schone investeringen daadwerkelijk te beïnvloeden (Brink 2014), is dan geen nationaal beleidsinstrumentarium gericht op een schoon elektriciteitssysteem nodig? Het Verenigd Koninkrijk is tot de conclusie gekomen dat dit onvermijdelijk is (Boot 2015). Als Nederland zich globaal dezelfde doelen zou stellen als het VK, is niet goed in te zien waarom dit niet voor Nederland zou gelden. Het gaat dan om een nationale minimum CO₂-prijs, een feitelijk verbod op de bouw van nieuwe kolencentrales, een ruimhartige inzet op demonstratie van CCS en het fors en gelijkwaardig

stimuleren van CO₂-arme elektriciteit (in het Engelse geval zowel hernieuwbare als kernenergie). Beredeneerd kan worden dat de subsidiering van beschikbare capaciteit in de elektriciteitsvoorziening een antwoord is op een zeer specifiek Engels probleem dat vooralsnog in Nederland minder geldt. De tweede vraag is of het in algemene zin verstandig is om te zoeken naar specifiek Nederlandse beleidsinstrumenten. Het antwoord op die vraag is niet evident. Voor de gebouwde omgeving hebben we nationale doelen en is er sprake van een nationale context. Eigen beleidsinstrumenten liggen dan voor de hand, lering trekkend uit wat elders meer of minder goed werkt. In de transportsector is veel beleid Europees, met een aanvulling door fiscale instrumenten en maatregelen die de vervoersstromen trachten te beïnvloeden. Men kan stellen dat we zozeer verbonden zijn met een land als Duitsland, dat het grote voordelen heeft te zoeken naar zoveel mogelijk met dat land afgestemde beleidsinstrumenten. Voor bijvoorbeeld de ondersteuning van hernieuwbare energie lijkt dit voor de hand te liggen. Maar het is niet in alle gevallen noodzakelijk. Elk land zal zijn bijdrage aan de transitie moeten leveren. Maar de echte waarde van de Nederlandse bijdrage ligt niet zozeer in de getalsmatige omvang. Die is buitengewoon klein, in elk geval bij de aanpak van het klimaatprobleem.¹⁸ De waarde ligt meer in het feit dat we een dichtbevolkt hoogontwikkeld land zijn waar – uiteraard na zorgvuldige reflectie – nieuwe aanpakken uitgeprobeerd kunnen worden. Bij goede voorbereiding kunnen we een proeftuin zijn en leerervaringen opdoen waar anderen iets aan hebben. Dat is de rol die Denemarken (en Zweden) al jaren met verve spelen (zie bijdrage Notenboom en Ybema), en waar men bepaald geen schade van heeft. Inzake bijvoorbeeld de flexibiliteit van het elektriciteitsnet kan dat ook beter samen met Duitsland. Noordwest-Europa heeft hier alles in huis de proeftuin van de wereld te worden, omdat we hoogwaardige kennis hebben en in het aandeel variabele hernieuwbare elektriciteit (zon en wind) ongeveer 10 jaar voorlopen op China en de Verenigde Staten (IEA 2014c).

De derde vraag is of het beleidsinstrumentarium op orde is om de in Europa af te spreken niet-ETS doelen te halen. Dat is afhankelijk van de vraag wat het precieze doel wordt en hoe dat wordt verdeeld over de sectoren. Bij een doel voor 2030 van -38 procent ten opzichte van 2005 voor Nederland en het meetellen van het eerdere overschot, zou Nederland nauwelijks extra beleid nodig hebben als het sterk op de lange termijn gerichte tussendoel voor verkeer in 2030 uit het Energieakkoord wordt gehaald. Als voor de overige sectoren de ambities vergelijkbaar worden met voor verkeer is er wel extra beleid nodig. Verstandig beleid, ook in het licht van de periode erna, omvat efficiencybevordering, de inzet van gas in de scheepvaart, hernieuwbare energie – met name ook in de verwarming – en het verplaatsen van emissies

¹⁸ Het aandeel van Nederland in de mondiale broeikasfasemissies bedroeg in 1990 0,55 procent, in 2000 0,53 procent en in 2012 0,36 procent (EDGAR database). Dat van heel Europa in de CO₂ emissies bedroeg in 2012 10,8 procent, wat in het standaardscenario van het IEA zal dalen naar 6,1 procent in 2040 (IEA 2014b).

van de niet-ETS naar de ETS-sector (waar reducties goedkoper zijn) door elektrificatie en het gebruik maken van restwarmte in daartoe geschikte regio's (ECN en PBL 2014).

6. *De rol van de overheid.* Soms wordt gesteld dat de kern van effectief overheidsoptreden behelst dat de overheid de randvoorwaarden bepaalt zodat marktpartijen kunnen investeren. In bijvoorbeeld de industrie is dat juist, in grote delen van de gebouwde omgeving en het transport ook – zij het dat de overheid vooral in de laatste sector door het fiscaal beleid erg veel bepaalt. Maar in de elektriciteitssector is dit beeld achterhaald. Mondiaal vond in 2000-12 30 procent van de investeringen in de netten plaats (dus geheel gereguleerd en in Nederland daarenboven overheidseigendom) en 70 procent in de productie, waarvan in het standaardscenario ruwweg driekwart gesubsidieerd is (hernieuwbare energie en vaak ook kernenergie). Rond de 80 procent van de investeringen worden aldus door de overheid bepaald (IEA 2014d). Dan is het maar beter daar ook een heldere visie voor te ontwikkelen. Dat zou ook helpen het vertrouwen van marktpartijen verder te vergroten, waardoor de kapitaalkosten dalen.

7 Ten slotte

Bij alle onzekerheden – vooral over energieprijzen, geopolitiek, maatschappelijk draagvlak, de vraag of een stevig mondiaal klimaatakkoord tot stand zal komen en daarmee de rol van gas in de energiehuishouding – zijn ook enkele uitspraken met enige stelligheid te doen. Een duurzame energiehuishouding is een breed begrip, maar de dimensie van het tegengaan van klimaatverandering geeft nog steeds de grootste urgentie om tot extra inspanning te komen. Vermindering van importafhankelijkheid en een betere luchtkwaliteit liften mee als de Nederlandse inspanning Europees is ingebed. Omringende landen hebben laten zien dat het formuleren van eigen doelen en inzetten op duurzaamheid ook economische kansen kan bieden. Ik trek uit het voorgaande vijf conclusies.

Tot 2030 zijn de bouwstenen van een duurzame energiehuishouding vrij robuust. Energiebesparing is cruciaal. De elektriciteitsvoorziening moet grotendeels emissie-arm zijn. Windenergie wordt daarbij het Nederlandse trekpaard. Flexibilisering van het elektriciteitssysteem is daartoe noodzakelijk. De Nederlandse brandstofmix blijft aanzienlijk van het Europees gemiddelde afwijken, wat een risico van afwijkende kosten met zich meebrengt. Voorbereiding van grootschalige inzet van CCS – waarvoor Nederland comparatieve voordelen heeft – zou dat verschil reduceren.

Alleen emissiehandel als beleidsinstrument zal de transitie van de elektriciteitssector niet voor elkaar krijgen. Verbetering hiervan is cruciaal. Er wordt hard aan gewerkt in Brussel, maar het is steeds urgenter om – liefst samen met omringende landen – ook terugvalopties te doordenken, zoals het Verenigd Koninkrijk al heeft geïntroduceerd.

De discussie over het Nederlandse doel voor 2030 in de niet-ETS-sector is nog niet afgerond, maar niet ondenkbaar is dat dit geen noodzaak met zich mee zal brengen van veel extra beleid. We mogen ons daardoor echter niet in slaap laten sussen, want over de hele periode 2010-50 moet de jaarlijkse Europese broeikasgasreductie driemaal hoger zijn dan reeds werd gerealiseerd. In Nederland zal dat niet veel anders zijn. Juist in de gebouwde omgeving, waar Nederland eigen speelruimte heeft en we op tijd moeten beginnen, is er alle reden vooral het ambitieuze 2050 doel in het vizier te houden.

Overkoepelend kan de beleidsinzet zijn om in de periode 2023-2030 iets minder geld te besteden aan 'uitrol' van toepassingen van hernieuwbare energie die nu nog erg duur zijn en de opbrengst daarvan ten goede te laten komen aan RD&D van opties met groot potentieel – met een nadruk op demonstratieprojecten en vervolgens de eerste fase van toepassing, die relatief duurder zullen zijn dan pure R&D. Als CCS rond 2030 niet tegen aanvaardbare kosten beschikbaar zal zijn, lopen we reële risico's dat de versnelling van broeikasgasreductie die daarna nodig is, niet gerealiseerd kan worden.

De markt zal deze transitie niet zomaar realiseren. Maatschappelijke partijen en overheid hebben in ons land het Energieakkoord getekend, wat een cruciale rol speelt in het bereiken van de 2020/23 doelen. Nederland heeft daar vooral zo'n moeite mee omdat we laat aan de uitvoering zijn begonnen. Het zou goed zijn als de overheid de transitiedoelen voor 2030 en 2050 tijdig en duidelijk zou formuleren en de uitvoering ervan zou borgen. Een vorm van wetgeving, zoals in het Verenigd Koninkrijk en Frankrijk al gerealiseerd zijn, ligt dan voor de hand.

Auteur

Pieter Boot (Pieter.Boot@pbl.nl) is hoofd van de sector Klimaat, Lucht en Energie van het Planbureau voor de Leefomgeving.

Literatuur

- Behrens, A., C. Coulie, J. Teusch, 2014, The Potential Evolution of the European Energy System to 2020 and 2050, CEPS Working Document 392.
- Boot, P., 2015, Energie- en klimaatbeleid in het Verenigd Koninkrijk: lessen voor Nederland, Internationale Spectator.
- Bosetti, V., G. Marangoni, E. Borgonovo, L. Diaz Anadon, R. Barron, H.C. McJeon, S. Politis, P. Friley, 2015, Sensitivity to energy technology costs: A multi-model comparison analysis, Energy Policy 80.
- Brink, C., 2014, Raming CO2-prijs in de Nationale Energieverkenning, PBL-notitie.
- CPB, PBL en SCP, 2014, Monitor Duurzaam Nederland 2014: Verkenning. Uitdagingen voor adaptief energie-innovatiebeleid Den Haag.
- CEER, 2015, Council of European Energy Regulators, Status Review of Renewable and Energy Efficiency Support Schemes in Europe in 2012 and 2013, Brussel.

- ECN en PBL, 2014, EU-doelen Klimaat en energie 2030: Impact op Nederland, Petten.
- Energy Post, 2014, Experts warn: the 'Great European Energy Transition' can still go wrong, 5 mei.
- Europese Commissie, 2011, Energy Roadmap 2050, COM (2011) 885/2.
- Europese Commissie 2011a, Impact Assessment Roadmap 2050.
- EZ 2015, Ministerie van Economische Zaken, Kabinetsreactie Monitor Duurzaam Nederland/Verkenning Energie-innovatiebeleid, 9 januari.
- HM Government, 2010, 2050 Pathways Analysis, Londen.
- IEA, 2012, Energy Technology Perspectives 2012, Pathways to a Clean Energy System, Parijs.
- IEA, 2014, Energy Technology Perspectives 2014, Harnessing Electricity's Potential, Parijs.
- IEA, 2014a, Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy 2014 edition, Parijs.
- IEA, 2014b, World Energy Outlook 2014, Parijs.
- IEA, 2014c, Technology Roadmap Energy storage, Parijs.
- IEA, 2014d, World Energy Investment Outlook, Parijs.
- IEA, 2015, Energy Technology Perspectives 2015, Parijs.
- Knopf, B., Y.-H. Henry Chen, E. de Cian, H. Foerster, A. Kanudia, I. Karkatsouli, I. Koppo, T. Koljonen, K. Schumacher, D.P. van Vuuren, 2013, Beyond 2020 – Strategies and costs for transforming the European energy system, Climate Change Economics vol. 4 suppl. 1.
- Londo, H.M. en P.A. Boot, 2013, Het Energieakkoord: wat gaat het betekenen? Inschatting van de gemaakte afspraken, Petten en Den Haag.
- PBL en ECN, 2011, Naar een schone economie in 2050: routes verkend. Hoe Nederland klimaatneutraal kan worden, Den Haag.
- PBL en KNMI, 2015, Klimaatverandering. Samenvatting van het vijfde IPCC-assessment en een vertaling naar Nederland, Den Haag.
- Ros, J. en B. Daniels, 2015, Sectordoelen voor niet-ETS broeikasgasemissies in 2030, Den Haag en Petten.
- SEO, 2014, Beleidsdoorlichting energiebeleid 2007 t/m 2012, Amsterdam.
- Shell, 2013, New Lens Scenarios.
- Simoes, S., W. Nijs, P. Ruiz, A. Sgobbi, D. Radu, P. Bolat, C. Thiel, S. Peteves., 2013, The JRC-EU-TIMES model. Assessing the long-term role of the SET Plan Energy technologies, JRC Scientific and Policy Reports.
- Verdonk, M. en P. Boot, 2011, Beleid voor Klimaat en hernieuwbare energie: op weg naar 2050, PBL-notitie, Den Haag.
- WEC, 2014, World Energy Council, 2014 World Energy Issues Monitor.
- WEC, 2014a, World Energy Council, World Energy Trilemma 2014: Time to get real – the myths and realities of financing energy systems.
- Zachmann, G., A. Serwaah en M. Peruzzi, 2014, When and how to support renewables? Letting the data speak, Bruegel working paper 2014/01.