



Naar een schone economie in 2050: routes verkend

Hoe Nederland klimaatneutraal kan worden



Planbureau voor de Leefomgeving



Naar een schone economie in 2050: routes verkend

Naar een schone economie in 2050: routes verkend

Hoe Nederland klimaatneutraal kan worden

Planbureau voor de Leefomgeving

Energieonderzoek Centrum Nederland

Verkenning van routes naar een schone economie in 2050

Hoe Nederland klimaatneutraal kan worden

© Planbureau voor de Leefomgeving (PBL)

Den Haag, 2011

ISBN: 978-90-78645-79-5

PBL-publicatienummer: 500083014

ECN-rapportnummer: ECN-O- -11-076

Eindverantwoordelijkheid

Planbureau voor de Leefomgeving

Contact

jan.ros@pbl.nl

robert.koelemeijer@pbl.nl

Projectleiding

Jan Ros (PBL) projectleider en Robert Koelemeijer (PBL) plaatsvervangend projectleider

Kernteam

Jan Ros, Robert Koelemeijer, Hans Elzenga en Jeroen Peters (allen PBL) en Michiel Hekkenberg (ECN) Peter Bosch heeft bijdragen vanuit TNO verzorgd en gecoördineerd.

Overige inhoudelijke bijdragen

PBL: Pieter Hammingh, Hans Nijland, Jan van Dam, Marian van Schijndel, Ruud van den Wijngaart, Rob Folkert, Sietske van der Sluis, Koen Overmars, Pieter Boot, Jan Matthijsen, Jos Notenboom, Kees Peek, Anton van Hoorn, Niels Sorel, Anco Hoen, Corjan Brink, Sonja Kruitwagen.
ECN: Bert Daniëls, Sytze Dijkstra, Ton van Dril, Coen Hanschke, Pieter Kroon, Marijke Menkveld,

Arjan Plomp, Rodrigo Rivera Tinoco, Herman Snoep, Joost van Stralen, Casper Tigchelaar, Paul Vethman, Wouter Wetzels.

TNO: Suzanne de Vos-Effting, Sonja Döpp, Vera Rovers, Herman Kok, Toon Ansems, Harm ten Broeke, Toon van Harmelen, Arjan van Horssen, Jeroen Kuenen, Magdalena Jozwicka, Tinus Pulles.

Externe reviewers op conceptstukken

Kornelis Blok (Ecofys), Erik Lysen (Universiteit Utrecht), Leonie Meulman en Nora Meray (CIEP, Instituut Clingendael), Frans Rooijers (CE), Ivo Opstelten (SEV), Jochem van der Waals (Ministerie IenM), Herbert Krajenbrink (Ministerie ELenI), Ewout Visser (Ministerie van Financiën) en Jos Verlinden (Ministerie BZK).

Daarnaast heeft AgentschapNL het project ondersteund met adviezen, waaraan is bijgedragen door Dirk Both, Lydia Dijkshoorn, Vivienne Tersteeg, Wilco Fiechter, Jan van Bergen, Jaap 't Hooft, Kees Kwant, Freek Smedema, Sonja Munnix, Maus Dieleman.

Redactie figuren

Marian Abels, Filip de Blois en Jeroen Peters

Eindredactie

Simone Langeweg Tekst en Communicatieadvies (redactie Bevindingen) en Uitgeverij PBL, Den Haag

Opmaak

Uitgeverij RIVM, Bilthoven

Druk

Van Deventer, 's-Gravenzande

U kunt de publicatie downloaden of bestellen via de websites www.pbl.nl en www.ecn.nl, of opvragen via reports@pbl.nl onder vermelding van het PBL-publicatienummer of het ISBN-nummer en uw postadres. Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: PBL/ECN (2011), *Naar een schone economie in 2050: routes verkend. Hoe Nederland klimaatneutraal kan worden*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) is het nationale instituut voor strategische beleidsanalyses op het gebied van milieu, natuur en ruimte. Het PBL draagt bij aan de kwaliteit van de politiek-bestuurlijke afweging door het verrichten van verkenningen, analyses en evaluaties waarbij een integrale benadering vooropstaat. Het PBL is voor alles beleidsgericht. Het verricht zijn onderzoek gevraagd en ongevraagd, onafhankelijk en altijd wetenschappelijk gefundeerd. Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) is het grootste onderzoeksinstituut in Nederland op energiegebied. Hier wordt kennis en technologie ontwikkeld met en voor de markt die een transitie naar een duurzame energiehuishouding mogelijk maken.

Voorwoord

Een beperking van klimaatverandering tot een acceptabel niveau vraagt op de lange termijn een aanzienlijke vermindering van broeikasgasemissies en daarmee een ingrijpende verandering van het energiesysteem. De tijdspanne tot 2050 is daarvoor zelfs krap te noemen. De realisatie is complex, biedt vele kansen aan bedrijven, maar is ook omgeven door vraagtekens. Er zijn vier belangrijke bouwstenen voor een schoon energiesysteem: vermindering van de energievraag, inzet van biomassa, CO₂-afvang en -opslag en meer productie en gebruik van schone elektriciteit (uit wind, zon en/of kernenergie). Elk van deze bouwstenen is van cruciaal belang, maar er zijn nog onzekerheden over de mogelijkheden van innovatieve technieken, de beschikbaarheid van voorraden en de haalbaarheid van institutionele aanpassingen.

Het kabinet-Rutte heeft aangegeven een routekaart te willen opstellen naar een schoner Nederland in 2050. Deze kan de basis zijn voor duidelijk en consistent beleid, gericht op de lange termijn. De verdere ontwikkeling en toepassing van elk van de bouwstenen kan daarin een plaats krijgen. De af te leggen weg zal het karakter krijgen van een zoektocht, omdat telkens moet worden ingespeeld op nieuwe kennis en veranderde omstandigheden. Leertrajecten vormen dan ook een belangrijk onderdeel van de route.

Het is aan de stakeholders en de overheid om samen invulling te geven aan de routekaart. Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) heeft dit rapport samen met het Energieonderzoekcentrum Nederland (ECN) opgesteld op verzoek van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu ter ondersteuning van het beleidsproces. Het biedt een verkenning van de technische mogelijkheden en onmogelijkheden en reikt ideeën aan voor stappenplannen en zinvolle acties voor de korte termijn.

Prof. dr. Maarten Hajer
Directeur Planbureau voor de Leefomgeving

Inhoud

Bevindingen

Naar een schone economie in 2050: routes verkend 12

Hoofdconclusies 12

Inleiding 16

Het huidige Nederlandse energiesysteem 18

Referentiebeeld in 2050 20

Vier bouwstenen voor een systeem met lage emissies 20

Robuuste elementen voor Nederland in 2050 28

Belangrijke stappen in leer- en implementatietrajecten 37

Veelvoorkomende barrières en de mogelijke overheidsrol 41

1 Inleiding 46

1.1 De internationale beleidscontext van de klimaatroutekaart 46

1.2 De doelstelling van deze studie 47

1.3 Methodische aanpak: backcasting 48

1.4 Opbouw van het rapport 50

2 De vraag naar energie en energiebesparing 54

2.1 Inleiding 54

2.2 Productie-consumptieketens 55

2.3 Consumptie en productie in 2050 volgens het referentiebeeld 56

2.4 Overzicht van de mogelijke ontwikkelingen in de energievraag 58

2.5 Energiegebruik transport 59

2.6 Warmtegebruik gebouwde omgeving 62

2.7 Energiegebruik elektrische apparaten 63

2.8 Energiegebruik industrie 64

2.9 Energiegebruik landbouw 67

3	Mogelijkheden van en beperkingen in het energieaanbod	68
3.1	Inleiding	68
3.2	Fossiele brandstoffen en uranium	69
3.3	Biomassa	69
3.4	Opslagcapaciteit voor CO ₂	74
3.5	Bodemwarmte	75
3.6	Ruimte voor windenergie	77
3.7	Zonne-energie	79
3.8	Kernenergie	80
3.9	Waterreservoirs voor opslag van energie	81
4	Technieken in 2050	84
4.1	Inleiding	84
4.2	Verkeer en vervoer	85
4.3	Warmtevoorziening in de gebouwde omgeving	86
4.4	Industrie (exclusief olieketen)	88
4.5	Raffinaderijen, petrochemie en chemie	89
4.6	Elektriciteitsvoorziening	91
4.7	Productie gas: methaan en waterstof	92
4.8	Landbouw	94
4.9	Overige emissies	96
5	Het energiesysteem in 2050	98
5.1	Inleiding	98
5.2	Uitgangspunten voor modelmatige analyses	99
5.3	Resultaten van de modelanalyses	102
5.4	Emissievermindering in de verschillende sectoren	117
6	De transitie: stappen op de route	118
6.1	Inleiding	118
6.2	Stappenplan bio-energie	120
6.4	Stappenplan elektriciteit uit wind	124
6.5	Stappenplan internationaal elektriciteitsnetwerk	126
6.7	Stappenplanbestaande woningen richting klimaatneutraal	130
6.8	Korte beschrijving van belangrijke stappen voor andere deelsystemen	132
6.9	Benodigde termijnen voor transities	138

7	Directe kosten van een emissiearm energiesysteem en economische effecten van de transitie	143
7.1	Inleiding	143
7.2	Kostencomponenten van het energiesysteem	143
7.3	Analyse van de jaarlijkse systeemkosten van een toekomstig energiesysteem	146
7.4	Kosten als barrière naar een emissiearm energiesysteem	149
7.5	Economische effecten van de transitie en kansen voor Nederland	151
8	De rol van beleid in het transitieproces	155
8.1	Inleiding	155
8.2	Mogelijke beleidsimpulsen	156
8.3	Routekaarten in de omringende landen	160
	Literatuur	165

BEVINDINGEN

BEVINDINGEN

Naar een schone economie in 2050: routes verkend

Hoe Nederland klimaatneutraal kan worden

Hoofdconclusies

- **Een CO₂-arm energiesysteem in 2050 vergt een ingrijpend en langdurig veranderingsproces**

Er zijn veel varianten mogelijk voor een CO₂-arm energiesysteem in 2050. Met haar ambitie de broeikasgasemissies in 2050 met zo'n 80 procent te hebben teruggebracht streeft de Europese Unie zo'n systeem na. Eén ding is duidelijk: een CO₂-arm energiesysteem, in welke variant ook, ziet er heel anders uit dan het huidige systeem en vergt een ingrijpend en langdurig veranderingsproces. Ontwikkelingstrajecten voor innovatieve technologieën beslaan immers vele decennia. Daarnaast kost het veel tijd om bestaande producten en processen te vervangen door nieuwe en om de bijbehorende productieketens en infrastructuur in te richten. Voor het rendement op hun investeringen zijn bedrijven daarbij sterk van elkaar afhankelijk; de stappen die zij daarbij nemen, zullen voorzichtig zijn. Een termijn van veertig jaar voor de transitie naar een nieuw energiesysteem is daarom krap.

- **Benut alle bouwstenen voor een schone economie: vermindering van de energievraag, inzet van biomassa, afvang en opslag van CO₂ en schone elektriciteitsproductie**

De belangrijkste bouwstenen voor de transitie naar een schone economie in Nederland in 2050 zijn: vermindering van de energievraag, inzet van biomassa, afvang en opslag van CO₂ en elektriciteitsproductie zonder CO₂-emissies (dus: wind, zon, kernenergie) in combinatie met een hoger aandeel elektriciteit in het energiegebruik (elektrificatie). Het niet inzetten van één van deze bouwstenen zou het uiterste vergen van de andere

drie. Gezien de vele onzekerheden rond de maximale inzetbaarheid van elk van de bouwstenen is dat een risicovolle strategie.

Uitgaande van een gematigde economische groei en rekening houdend met het vastgestelde beleid en autonome verbetering in de technologie kan de energievraag in 2050 bijna 15 procent hoger uitvallen dan nu. Met een krachtig energiebesparingsbeleid voor alle sectoren is het mogelijk de energievraag in 2050 met nog eens 30 procent te verminderen. Om zo'n reductie te realiseren zijn waarschijnlijk relatief ook dure besparingsmaatregelen nodig, in beperkte mate aangevuld met gedragsverandering.

- **Bio-energie heeft noodzakelijkerwijs een groot aandeel in de schone economie**

Zonder de inzet van biomassa is het vrijwel onmogelijk om de CO₂-uitstoot met zo'n 80 procent te verminderen. Zeer waarschijnlijk zal het in Nederland nodig zijn biomassa te importeren. De onzekerheid over het toekomstige duurzame mondiale aanbod van biomassa is echter groot. Hoe groter de vraag naar biomassa, des te groter het risico op indirecte landgebruiksveranderingen. Wanneer bestaande landbouwgrond wordt gebruikt voor het telen van energiegewassen, kan dit ertoe leiden dat nieuwe landbouwgrond in gebruik moet worden genomen voor de productie voor voedselgewassen. Het gevolg: extra broeikasgasemissies.

Biomassa wordt bij voorkeur ingezet voor de productie van vloeibare biobrandstoffen en groen gas. Deze brandstoffen kunnen worden gebruikt voor bijvoorbeeld luchtvaart, vrachtttransport over de weg, kleine industrie en bestaande bouw. Voor deze sectoren is er nog weinig zicht op alternatieve, schone productietechnieken in 2050. Voor de elektriciteitsproductie zijn dergelijke alternatieven er wél. Bij- en meestook van biomassa in elektriciteitscentrales past daarom minder goed in het toekomstbeeld.

- **CO₂-afvang bij grote industriële installaties en centrales is van groot belang**

Door bij de productie van biobrandstoffen CO₂ af te vangen en op te slaan kunnen negatieve emissies worden gerealiseerd: er wordt netto CO₂ uit de atmosfeer gehaald, doordat de CO₂ die door de plant of boom voor de groei uit de lucht is gehaald, uiteindelijk in een opslagreservoir terechtkomt. Dit maakt het mogelijk om moeilijk te elimineren restemissies te compenseren, zoals CH₄ en N₂O afkomstig uit de landbouw.

De afvang en opslag van CO₂ is verder van belang bij grote industriële installaties en centrales. Hoewel Nederland zelf een redelijke opslagcapaciteit heeft in lege gasvelden, is deze capaciteit in verschillende van de onderzochte systeemvarianten niet voldoende om in de potentiële behoefte te voorzien. In het noordwestelijk deel van de Noordzee bevinden zich zeer grote aquifers, die mogelijk gedurende een groot aantal decennia voldoende opslagcapaciteit bieden voor heel Europa. Omdat er nog weinig of geen ervaring is met het verregaand vullen van dergelijke opslagreservoirs,

bestaat nog veel onzekerheid over de feitelijke opslagmogelijkheden. Dit geldt vooral voor de aquifers.

- **Elektriciteitsproductie uit windmolens, kerncentrales en zonnepanelen is potentieel groot, maar moeilijk regelbaar**

Elektriciteit uit windmolens, kerncentrales en zonnepanelen gaat niet gepaard met directe broeikasgasemissies. De potentiële productie uit deze bronnen is veel groter dan de huidige elektriciteitsvraag in Nederland. Wanneer de energievraag verschuift van brandstoffen naar elektriciteit (elektrificatie), biedt deze vorm van energie de basis voor een schoon systeem. De inzet van elektrische warmtepompen en elektrische auto's past bij een dergelijke elektrificatie. Het omzetten van tijdelijke overschotten aan elektriciteit in waterstof is een aanvullende mogelijkheid. De genoemde technieken hebben daarmee een aanzienlijk belang voor 2050, al gaat het te ver om elk van hen afzonderlijk onmisbaar te noemen.

Het risico van deze schone technieken voor elektriciteitsopwekking – vooral wind en zon – zit in de beperkte regelbaarheid van het aanbod. Voor een betrouwbare elektriciteitsvoorziening moeten vraag en aanbod op elkaar aansluiten. Een belangrijke oplossingsrichting is om het elektriciteitsaanbod meer uit te wisselen met de rest van Europa en mogelijk ook met Noord-Afrika. Vraag- en aanbodpatronen worden op die schaal gelijkmatiger. De opslag van duurzaam opgewekte energie in bergmeren biedt een aanvullende optie om vraag en aanbod meer in balans te brengen. De realisatie van een Europees elektriciteitsnetwerk is geen gemakkelijke opgave. Zij vergt een samenspel van alle Europese landen, met elk hun eigen belangen. Een alternatief waarop Nederland zelf meer greep kan hebben, is de omzetting van overschotten van schone elektriciteit in energiedragers als waterstof of koolwaterstoffen.

- **De kosten voor een schoon energiesysteem in 2050 zijn 0 tot 20 miljard euro per jaar hoger dan voor het huidige systeem**

De totale directe jaarlijkse kosten van een energiesysteem met maximaal 45 Mton aan broeikasgasemissies in 2050 zijn naar verwachting tussen 0 en 20 miljard euro per jaar hoger dan de kosten van een systeem gebaseerd op de huidige technieken. De grote bandbreedte is het gevolg van onzekerheid over enerzijds de kostenontwikkeling van veel nog in ontwikkeling zijnde technieken, en anderzijds de toekomstige prijzen van fossiele brandstoffen en biomassa. De kapitaalslasten voor de energievoorziening en energiebesparing worden hoger. Kosten voor brandstoffen gaan omlaag. De afhankelijkheid van olie, gas en kolen neemt aanmerkelijk af. Tegenover deze (waarschijnlijk) hogere directe kosten staan mogelijk positieve externe effecten op gezondheid en natuur, evenals vermeden kosten voor schade door en adaptatie aan klimaatverandering. Deze kosten zijn niet nader onderzocht of verwerkt in de resultaten van deze studie.

- **Innovatiebeleid nu is noodzakelijk voor een schone economie in 2050**

Om het doel van een schone economie in 2050 te hebben bereikt, is het van belang het innovatiebeleid nu al te richten op de nieuwe technische systemen die mogelijk een grote rol spelen in de toekomstige energievoorziening. De doelstellingen voor broeikgasemissies of hernieuwbare energie in 2020 geven daarvoor onvoldoende impulsen. Dergelijke systemen – bijvoorbeeld biomassavergassing, CO₂-afvang en -opslag, voertuigen op elektromotoren – zijn niet nodig om de doelstellingen voor 2020 te halen. Door hun (nu nog) relatief hoge prijs passen ze niet bij een kosteneffectieve aanpak op de korte termijn.

- **Internationale oriëntatie is essentieel bij de uitwerking van de routekaart**

Het doorlopen van leercurven is voor een belangrijk deel een internationaal proces. Een proces dat niet voor alle nieuwe technieken in Nederland plaats hoeft te vinden. Zou de toepassing van dergelijke technieken in Nederland echter langdurig worden uitgesteld, dan is het minder waarschijnlijk dat zij hier in 2050 ten volle kunnen worden benut. Het leren over de inpassing in het energiesysteem en het onderhoud van de techniek moet immers ook in Nederland gebeuren.

Het is aan stakeholders en overheid om de routekaart op weg naar een schone economie in 2050 verder uit te werken. Zij moeten daarbij specifiek aandacht schenken aan de verdere implementatie van innovatieve technologie, aan geschikte financieringsconstructies, instrumentkeuze, lastenverdeling, nieuwe samenwerkingsverbanden tussen betrokken bedrijven en de overheid, ruimte voor maatschappelijke initiatieven en het benutten van kansen op nieuwe markten. Oriëntatie op internationale ontwikkelingen is daarbij essentieel. Omringende landen (vooral Duitsland, Verenigd Koninkrijk en Denemarken) bieden nuttige voorbeelden die het Nederlandse beleid zouden kunnen inspireren. Versterkte samenwerking met de omringende landen kan eveneens meerwaarde leveren.

Inleiding

Uitgangspunt

In maart 2011 bracht de Europese Commissie een klimaatroutekaart uit. Deze routekaart verkent de mogelijkheden die er zijn om in Europa de broeikasgasemissies in 2050 met 80 procent te hebben verminderd ten opzichte van 1990. Deze emissiereductie acht de Commissie nodig als Europese bijdrage om de opwarming van de aarde te beperken tot 2 graden. Ook andere ontwikkelde en ontwikkelingslanden worden geacht een bijdrage daaraan te leveren.

Het kabinet-Rutte heeft het initiatief genomen om voor Nederland een klimaatroutekaart op te stellen. Het Ministerie van Infrastructuur en Milieu heeft PBL, ECN en TNO in dit kader gevraagd een overzicht te geven van de mogelijkheden voor en beperkingen van een verreгаande emissiereductie. In onze analyse zijn we – in lijn met de Europese routekaart – uitgegaan van een emissiereductie van 80 procent, ook voor Nederland. Daarbij realiseren we ons dat er voor 2050 nog geen doelstellingen per land zijn geformuleerd. Het reductiepercentage voor Nederland zou wat minder of meer kunnen zijn dan dat voor Europa als geheel. In alle gevallen echter brengt het klimaatbeleid een zeer forse vermindering van de broeikasgasemissies met zich.

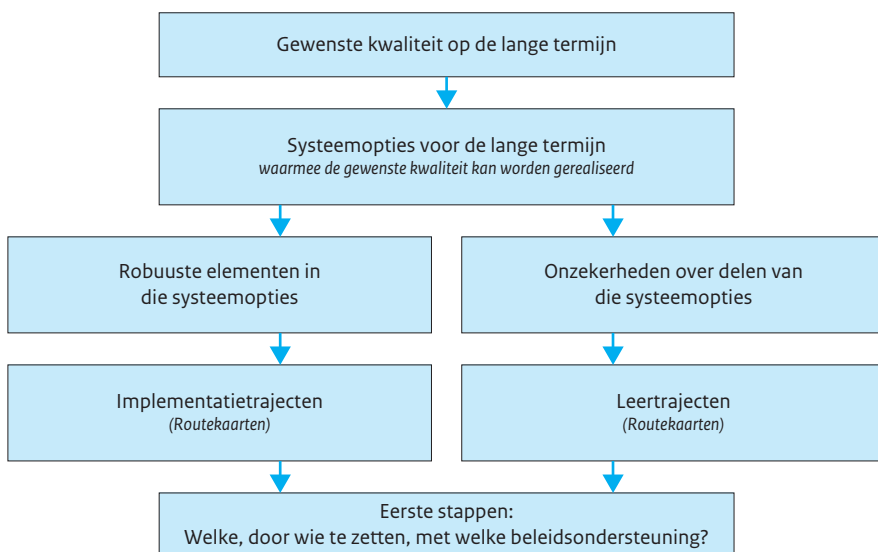
Het energiesysteem staat centraal in dit rapport. Om de broeikasgasemissies met 80 procent te verminderen is een fundamentele verandering nodig van vooral het energiesysteem. Immers, in de huidige situatie is een groot deel (zo'n 80 procent) van de broeikasgasemissies een direct gevolg van het gebruik van fossiele energie; de overige 20 procent hangt samen met voedselproductie, afvalverwijdering en industriële processen. Deze andere bronnen van broeikasgassen zullen we kort beschouwen.

Urgentie

Het jaar 2050 lijkt nog ver weg. De verreгаande doelstelling van de routekaart heeft echter zulke ingrijpende consequenties dat geen tijd mag worden verloren om die doelstelling in zicht te houden. De speelruimte in de tijd die het richtjaar 2050 biedt, moet ten volle worden benut voor de benodigde innovatie op systeemniveau. Het valt immers niet mee om los te komen van het bestaande (energie)systeem. De opbouw van een nieuw systeem met duurzame en schone technologieën vergt vele decennia. De investeringen die in het komende decennium worden gedaan, zullen het beeld van 2050 mede bepalen. En ook de voorbereidingen, de leerprocessen, de benodigde samenwerkingsverbanden en de vereiste procedures vragen vaak veel tijd. Al deze factoren maken dat het urgent is om nu een visie te ontwikkelen op de route naar een emissiearme samenleving in 2050 en om met die routekaart aan de slag te gaan.

Figuur 1

Methodiek van backcasting en de te volgen stappen



Doelstelling rapport

Dit rapport verkennt de route of – beter nog – de verschillende mogelijke routes naar de verschillende eindbeelden voor 2050 die denkbaar zijn. Met deze verkenning willen PBL, ECN en TNO de vele betrokken maatschappelijke partijen, inclusief de overheid, ondersteunen bij de verdere uitwerking van de routekaart. Het accent in de studie ligt op Nederland, zij het nadrukkelijk in de Europese en mondiale context. Uitgangspunt daarbij is dat ook de rest van de wereld meewerkt aan de uitvoering van een krachtig klimaatbeleid.

Analysemethode

In de analyse volgen we de methodiek van *backcasting*. Vanuit een gewenste kwaliteit op lange termijn redeneren we terug naar de stappen die nu gezet moeten worden om die kwaliteit in de toekomst te kunnen realiseren (zie figuur 1). Eerst analyseren we welke schone energiesystemen technisch realiseerbaar zijn. Dat levert vele combinaties van mogelijke technieken. Daaruit destilleren we de betekenis van de verschillende technieken voor het realiseren van een schone economie in 2050.

Vervolgens gaan we in op de stappen die nodig zijn op weg naar die schone economie, en de volgorde van die stappen. De routekaart zal niet alleen implementatietrajecten bij robuuste elementen omvatten, maar ook leertrajecten om onderweg tot goede keuzen te kunnen komen. De routekaart schetst een zoektocht met vele onzekerheden vooraf,

onder meer over de kosten. Daarom hebben we ervoor gekozen niet het meest kostenoptimale systeem op lange termijn te schetsen. We verkennen juist de diversiteit aan mogelijkheden om in 2050 een CO₂-arm energiesysteem te kunnen realiseren.

Het huidige Nederlandse energiesysteem

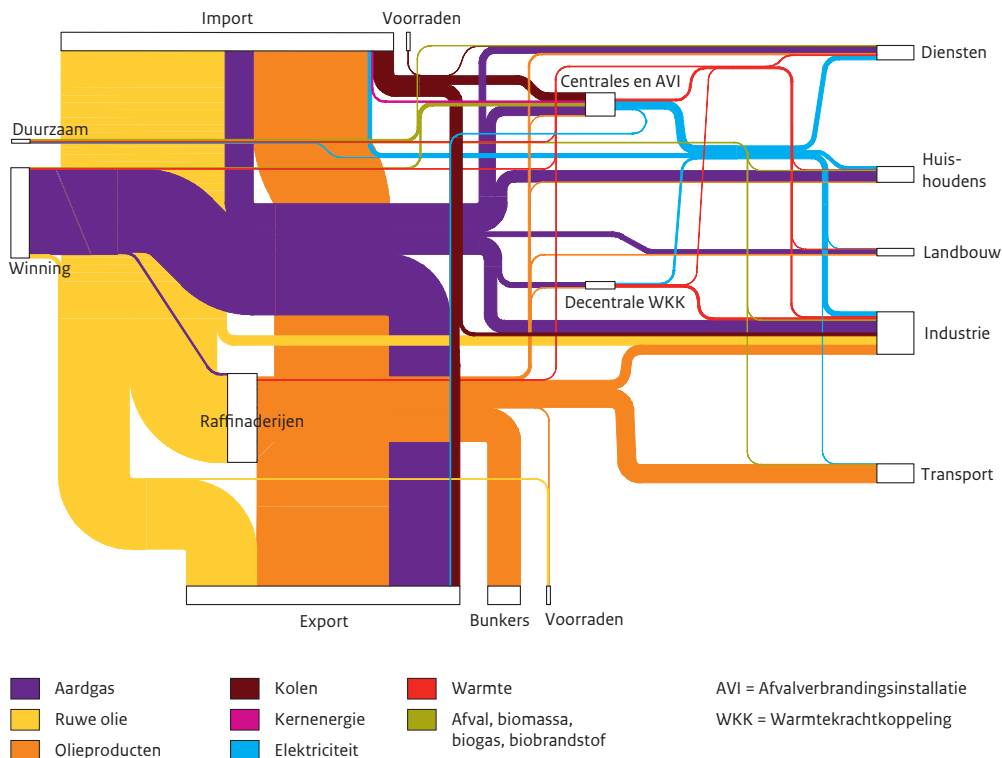
Hoe ziet het huidige Nederlandse energiesysteem eruit? Een korte schets geeft een gevoel voor de orde van grootte van de energiehuishouding in Nederland. Bovendien bepaalt de huidige situatie, in de gebouwde omgeving, de industriële productie en de infrastructuur, mede de energievraag in de toekomst.

Figuur 2 geeft een compacte illustratie van de huidige energiestromen in Nederland. Verschillende kleuren geven de energiedragers weer. De dikte van de stromen staat voor de energie-inhoud van de stroom. Nederland heeft een grote doorvoer van olie (ruwe olie en olieproducten). Raffinaderijen produceren vooral voor de export en voor 'bunkers' (brandstof die de internationale sloop- en luchtvaart in Nederland koopt). Een relatief klein deel van de olieproducten (benzine, diesel, nafta, stookolie enzovoorts) is bestemd voor de Nederlandse transportsector en industrie. Duidelijk is dat Nederland veel aardgas wint en dat ongeveer de helft daarvan bestemd is voor de export. Eveneens duidelijk is dat inmiddels een flink aandeel van het gas geïmporteerd wordt. Aan de rechterkant van de figuur staan de 'eindgebruikssectoren' (diensten, huishoudens, landbouw, industrie en transport). Huishoudens, diensten en landbouw gebruiken vooral gas (voor verwarming) en elektriciteit (vooral uit gas en kolen). De figuur laat ook zien dat de restwarmte die ontstaat bij energieconversie (in elektriciteitscentrales, warmtekrachtkoppeling (WKK) en raffinaderijen), nuttig wordt gebruikt.

In totaal komt het energiegebruik van Nederland als geheel op zo'n 3.500 petajoule (PJ; petajoule = 10¹⁵ joule). Het huidige jaarlijkse energiegebruik van alle eindgebruikssectoren samen (dat wil zeggen diensten, huishoudens, landbouw, industrie en transport) is zo'n 2.800 PJ. Dit is inclusief het niet-energetisch gebruik, zoals het gebruik van olie en gas voor kunststoffenproductie. Voor de productie van elektriciteit en het maken van de transportbrandstoffen uit ruwe olie is nog eens zo'n 700 PJ nodig.

Bij het verbranden van 1 PJ aan gas, olie en kolen komt respectievelijk ongeveer 57, 73 en 94 kiloton CO₂ vrij. De totale CO₂-emissie als gevolg van het verbranden van gas, olie en kolen komt daarmee op zo'n 180 Mton CO₂ (inclusief procesemissies). Daarbovenop komt nog de emissie van andere broeikasgassen (CH₄, N₂O en F-gassen) vanuit de landbouw en industrie: circa 30 Mton. We hebben in deze studie ook emissies van de internationale lucht- en sloopvaart meegenomen, naar rato van het Nederlandse aandeel in het mondiale bbp. Ze worden in de huidige internationale conventies weliswaar niet bij de nationale emissies meegeteld, maar ze dragen net zo goed bij aan

Figuur 2
Energiestromen in Nederland, 2009



Stroomschema van de huidige energiehuishouding in Nederland. De dikte van de stromen geeft de energie-inhoud van de stroom weer. Van links naar rechts is te zien: de winning van energie (geheel links), diverse omzettingen van energie, en het eindgebruik in verschillende sectoren (geheel rechts). Van boven naar beneden is te zien: import en export van energie, energiegebruik voor internationaal transport (bunkers) en voorraadmutaties.

klimaatverandering. Op deze manier gerekend is de bijdrage van internationaal transport ruim 10 Mton.

In 1990 lag de broeikasgasuitstoot van de genoemde bronnen in Nederland op 223 Mton CO₂-equivalenten. Een reductie van 80 procent ten opzichte van 1990 betekent dus een vermindering met bijna 180 Mton tot een restemissie van zo'n 45 Mton CO₂-equivalenten in 2050. Dat betekent dat de CO₂-emissie de komende veertig jaar met gemiddeld 4,5 Mton per jaar moeten worden teruggebracht. Een enorme opgave, te meer omdat de emissie de afgelopen twintig jaar ondanks alle beleid en technologische ontwikkelingen niet is gedaald.

Referentiebeeld in 2050

Om een beeld te krijgen van de hoeveelheid energie die we in 2050 in Nederland nodig zullen hebben, is het noodzakelijk om aannames te doen over de toekomstige productie- en consumptieniveaus. We gaan daarbij uit van de *Referentieraming energie en emissies 2010-2020* van ECN en PBL (2010), en trekken de daarin geschetste ontwikkelingen van de vraag naar goederen, diensten en transport door naar 2050.

In het referentiescenario zijn geen drastische wijzigingen verondersteld van de economische structuur in Nederland. Nederland zal een energie-intensieve industrie houden en de handel zal vooral op Europa georiënteerd blijven. Wel neemt het relatieve belang van de dienstensector verder toe. Tot 2020 is een jaarlijkse economische groei van 1,7 procent verondersteld; na 2020 neemt die groei af tot 1,3 procent (de arbeidsproductiviteit neemt nog wel verder toe, maar de beroepsbevolking daalt na 2020). In deze studie is verondersteld dat de bevolking toeneemt van 16,5 miljoen inwoners nu tot 17,5 miljoen inwoners in 2050. Deze ontwikkelingen beïnvloeden de mate van uitstoot van broeikasgassen in de komende decennia. Maar ook de technologie ontwikkelt zich verder, soms onder invloed van bestaand beleid.

Al met al levert dit een referentiebeeld voor 2050 op waarin het energiegebruik in de eindgebruikssectoren bijna 15 procent hoger ligt dan nu; de broeikasgasemissies komen rond het huidige niveau uit. Uiteraard kunnen de economie en de energievraag in 2050 wezenlijk anders zijn dan hierboven geschetst. Bij de analyse van mogelijkheden voor een schone economie hebben we daarom gewerkt met verschillende varianten voor de energievraag. Het is immers de energievraag die van grote invloed is op de broeikasgasemissies.

Vier bouwstenen voor een systeem met lage emissies

Vier groepen van vooral technische opties zijn de belangrijke bouwstenen voor een toekomstig emissiearm systeem:

- vermindering van de vraag naar energie;
- inzet van biomassa ter (gedeeltelijke) vervanging van kolen, gas, olie en olieproducten;
- afvang en opslag van CO₂;
- productie van elektriciteit zonder directe CO₂-emissies (met wind, zon en kernenergie) in combinatie met elektrificatie bij de energiegebruikers.

Deze vier groepen kunnen elk doordringen op vele plaatsen in het energiesysteem. Ze omvatten een grote variëteit aan technieken die nu al bekend zijn, maar vaak nog in de ontwikkelingsfase verkeren. Het is nooit helemaal uit te sluiten dat er de komende decennia nog nieuwe technieken ontwikkeld zullen worden. De kans dat dergelijke

nieuwe technieken in 2050 al een grote bijdrage leveren aan het energiesysteem is echter klein.

In deze studie richten we ons nadrukkelijk op de vermindering van broeikasgasemissies en gaan we niet in op alle overige voors en tegens van de technieken. Zo blijft de risicokant van kernenergie buiten beschouwing. We bespreken hier eerst de vele mogelijkheden en de beperkingen van de vier bouwstenen.

Vermindering van de vraag naar energie

In de hypothetische situatie dat de stand van de techniek in 2050 gelijk zou zijn aan die van nu, zou het energiegebruik fors toenemen (figuur 3, huidige technologie). Dit komt doordat de broeikasgasemissies gekoppeld zijn aan de productie en consumptie en daarmee aan de omvang van tal van economische activiteiten. Met de voortgaande economische groei is een toename van die activiteiten in 2050 te verwachten.

Mede als gevolg van bestaand beleid zoals normen voor nieuwbouwwoningen, elektrische apparaten en auto's, is in alle sectoren een autonome efficiëntieverbetering te verwachten. Ondanks die autonome verbeteringen laat het referentiebeeld een toename zien van het energiegebruik van bijna 15 procent ten opzichte van nu (figuur 3, autonome ontwikkeling). De toename zit vooral in de sector verkeer (onder meer luchtvaart) en in de industrie. De warmtevraag in de gebouwde omgeving wordt juist iets lager.

Extra maatregelen kunnen de energievraag verder verlagen. Hiervoor onderscheiden we drie typen aangrijpingspunten: efficiëntere productieprocessen, zuiniger producten en veranderingen in de consumptieve sfeer.

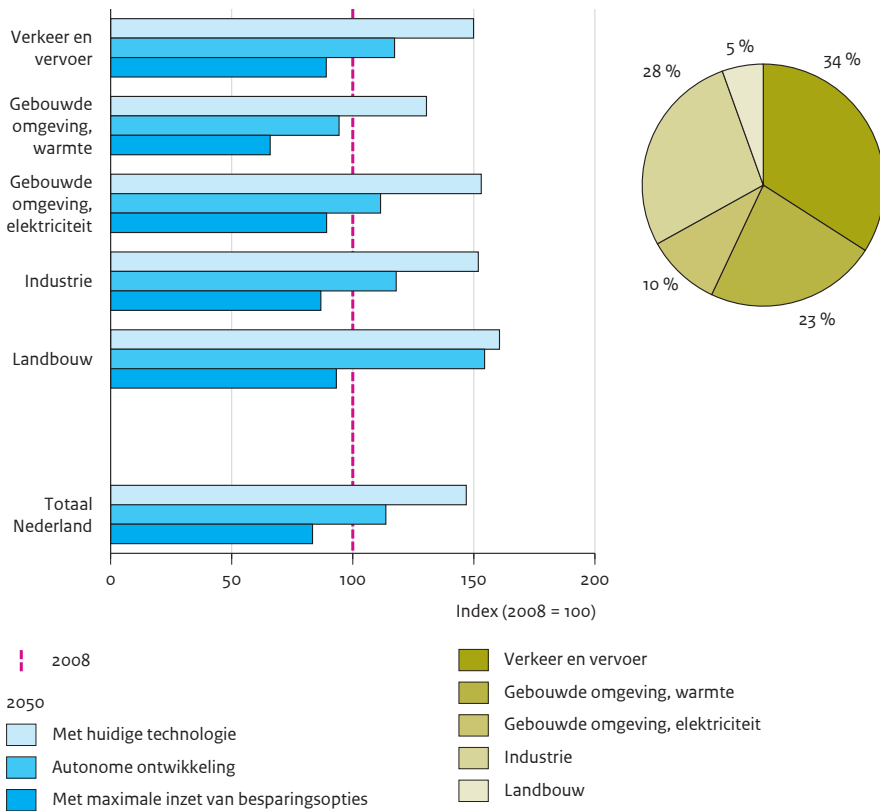
In de eerste plaats de efficiëntieverbetering in productieprocessen en -ketens. Door de grote diversiteit aan processen en producten, die er over veertig jaar bovendien heel anders uit zullen zien, kunnen we slechts ruwe schattingen geven van het totale besparingspotentieel. Een besparingstempo met 1,5 procent per jaar tot 2050 wordt haalbaar geacht en leidt tot een beperkte vermindering van het energiegebruik ten opzichte van het referentiebeeld. Om deze vermindering te realiseren moet bij de vervanging van installaties worden gekozen voor de best beschikbare technologieën van dat moment, de nieuwste processen, nieuwe versies van elektrische motorsystemen en scheidingstechnieken en nieuwe systeemconfiguraties als benutting van restwarmte.

In de tweede plaats kunnen het ontwerp en de vormgeving van producten zo worden aangepast (eco-efficiëntie) dat ze zuiniger zijn in het energiegebruik. Isolatie van woningen is een belangrijk voorbeeld van zuiniger ontwerp. Figuur 3 laat onder andere zien welke besparing potentieel mogelijk is als bestaande woningen gemiddeld naar label B-niveau worden gebracht. Ook auto's kunnen nog zuiniger worden, evenals de elektrische apparaten die in huishoudens en bij bedrijven worden ingezet.

Figuur 3
Energievraag per sector

Referentiebeeld, 2050

Bijdrage sectoren, 2008



De vraag naar energie in 2050, bij activiteitsniveaus zoals in het referentiebeeld, met de energievraag bij de huidige technologie, met een efficiëntieverbetering zoals verondersteld in het referentiebeeld, en bij benutting van het maximale technische potentieel voor vermindering van de energievraag. Bij deze laatste variant zijn ook enkele consumptieve veranderingen meegenomen.

Ten slotte zijn er in de consumptiesfeer mogelijkheden voor energiebesparing. Bijvoorbeeld door andere keuzen te maken, zoals de fiets nemen of reizen met het openbaar vervoer in plaats van met de auto, de thermostaat een graadje lager zetten of minder dierlijke producten eten. De praktisch haalbaar geachte extra besparing door dergelijke gedragsmaatregelen ligt veelal in de orde van 10 tot 15 procent, hoewel dit uiteindelijk sterk samenhangt met het belang dat de mensen er zelf aan hechten.

Als er minder dierlijke producten worden geconsumeerd, of als voor producten lichtere materialen worden gebruikt, dan leidt dit tot een emissievermindering in de productieketens. Door de relatief grote import en export van grondstoffen en producten is die doorwerking in veel gevallen niet of nauwelijks merkbaar als een emissievermindering van de industrie of de landbouw in Nederland zelf. Vanuit een globaal perspectief kunnen deze ingrepen echter wel veel milieuwinst opleveren.

De genoemde maatregelen tezamen leiden tot een haalbaar geachte vermindering van de energievraag met zo'n 30 procent ten opzichte van het referentiebeeld (figuur 3, maximale inzet van besparingsopties). In de analyses gebruiken we daarom varianten van de energievraag tussen die van het referentiebeeld en een niveau dat 30 procent lager ligt.

Inzet van biomassa

Duurzaam geteelde biomassa is aantrekkelijk als potentiële vervanger van kolen, olieproducten en aardgas. De CO₂ die vrijkomt bij de verbranding, telt niet mee in de emissietotalen. Deze wordt immers gecompenseerd door de opname van het broeikasgas tijdens de groei van de biomassa.

Biomassa kan worden ingezet om energiedragers in vele vormen te produceren: vast, vloeibaar, gasvormig (ook waterstof), warm water en elektriciteit. Bij zoveel toepassingsmogelijkheden kan de vraag naar biomassa zeer sterk toenemen. Het duurzame mondiale aanbod is echter niet onbeperkt. Ramingen voor de beschikbaarheid in 2050 variëren enorm. Op basis van de meeste literatuurbronnen wordt een duurzaam aanbod van 150 exajoule (EJ; exajoule = 10¹⁸ joule) mogelijk geacht. Deze raming kan hoger uitvallen, tot 400 EJ, maar daarmee wordt ook de onzekerheid groter of het aanbod op duurzame wijze kan worden gerealiseerd. Een aantal factoren bepaalt de spreiding in de literatuur van de potentieel beschikbare hoeveelheid biomassa in 2050:

- Voor de teelt van biomassa is land nodig. Dat geldt zowel voor landbouwproducten als voor houtplantages. Het voor de teelt van biomassa benodigde land gaat altijd ten koste van andere landgebruiksfuncties; in de praktijk zijn dat vooral de natuurlijke systemen. Productiviteitsstijging in de land- en bosbouw kan ertoe leiden dat land vrij komt. Naarmate dit het geval is, neemt het potentieel aan biomassa voor energie toe. Het dan beschikbare land kan echter ook nodig zijn om te voldoen aan de groeiende vraag naar voedsel, en vooral naar dierlijke producten. Verschillen in scenarioveronderstellingen leiden tot verschillen in het berekende potentieel aan biomassa voor energie. Daarnaast zouden arme of gedegradeerde gronden met weinig waarde voor de teelt van voedingsproducten of voor de biodiversiteit kunnen worden benut. Op die gronden zouden sommige energiegewassen met een redelijke opbrengst kunnen worden geteeld. Omdat de bedrijfseconomische haalbaarheid hiervan een groot vraagteken is, blijven kwalitatief betere gronden vanuit dat perspectief aantrekkelijker.
- De benutting van afvalstromen van bedrijven en huishoudens en van reststromen van de landbouw en uit bossen vraagt geen land. Het is echter onzeker in welke mate deze

stromen beschikbaar zijn voor energietoepassingen. Immers, voor een deel kunnen die ook andere nuttige toepassingen hebben of krijgen, zoals veevoer.

- Een groot deel van het geschatte biomassapotentieel bevindt zich in landen die momenteel een lage organisatiegraad kennen. Een vraag is of de benodigde institutionele veranderingen om het geschatte potentieel te verwezenlijken tijdig kunnen worden gerealiseerd.
- Er kunnen wellicht nieuwe grondstoffen voor bio-energie worden geproduceerd, zoals algen. Op dit moment is de toepassing van deze nieuwe grondstoffen voor energie bedrijfseconomisch onhaalbaar. Om de kosten te verlagen is het zeker nodig de leercurve verder te doorlopen, maar er is grote onzekerheid over het mogelijke eindresultaat.

In onze analyses is het toekomstig aanbod aan biomassa voor Nederland gevarieerd tussen 0 en 1.000 PJ. Het gaat hierbij om primaire energie. Er treden nog conversieverliezen op bij omzetting naar bijvoorbeeld biobrandstoffen, groen gas, elektriciteit of warmte. Nederland zelf kan in 2050 rond de 200 PJ aan biomassa leveren voor toepassing in het energiesysteem. Dat is zeer waarschijnlijk onvoldoende om aan de vraag naar biomassa te voldoen. Wat betekent het mondiale aanbod van 150 of mogelijk 400 EJ aan biomassa dan voor de potentiële import van deze energiebron? Bij een gelijke verdeling per hoofd van de wereldbevolking zou dit neerkomen op een aanbod voor Nederland van 300 tot 750 PJ; bij een gelijke verdeling per eenheid nationaal product ruim het dubbele. Er moet echter rekening worden gehouden met het feit dat landen die veel biomassa produceren, deze zelf relatief veel zullen gaan gebruiken. Daarbij komt nog dat alleen droge biomassa over grote afstanden transporteerbaar is.

Toekomstige mondiale schaarste zal leiden tot stijgende biomassaprijzen. Efficiëntieverbetering in de (mondiale) landbouw daarentegen kan juist leiden tot prijsdaling. Welk aanbod tegen welke prijs beschikbaar is, is onzeker. Bovendien geldt dat biomassa-exporterende landen ook worden geconfronteerd met doelstellingen voor emissies van broeikasgassen. Zij krijgen er dus belang bij om de CO₂-opname binnen hun landsgrenzen te gelde te maken.

Een bijzonder aandachtspunt bij biomassa zijn de emissies in de productieketen, vaak buiten de grenzen van Nederland.. Niet alleen zijn er broeikasgasemissies bij transport. Ook bij de teelt doen die emissies zich voor, door de inzet van kunstmest en werktuigen. Daarnaast is er een potentieel nog grotere bron. Waar natuurlijke grond, direct of indirect, wordt omgezet in landbouwgrond, komt er aanvankelijk veel extra CO₂ in de lucht. Dit komt doordat natuurlijke bodems veelal meer koolstof bevatten dan landbouwbodems. Soms komt er zoveel CO₂ in de lucht dat in bepaalde situaties de totale emissievermindering die optreedt doordat fossiele producten worden vervangen door bio-energie, over een aantal decennia teniet wordt gedaan. De biomassagerelateerde broeikasgasemissies bij het landgebruik en de landgebruiksveranderingen buiten de grenzen tellen voor Nederland niet mee, maar ze

zijn wel het gevolg van gebruik in Nederland. Dit is een belangrijk punt bij de verdere uitwerking van duurzaamheidscriteria.

Afvang en opslag van CO₂

Voor grote industriële installaties is het afvangen van CO₂ een optie om emissie naar de lucht te vermijden. Er zijn verschillende opslagmogelijkheden. Diepe watervoerende lagen (zoute aquifers) en lege gas- en olievelden zijn de belangrijkste. In Nederland gaat het vooral om lege gas- en olievelden; deze hebben een opslagcapaciteit van in totaal circa 2.200 Mton. Daarvan bevindt bijna de helft zich onder land. Het Slochterenveld is nog niet beschikbaar voor CO₂-opslag. In 2050, en waarschijnlijk nog vele jaren daarna, zal dit gasveld nog niet volledig leeg zijn. Om de kosten hanteerbaar te houden moet de opslagcapaciteit over een bepaalde periode kunnen worden ingezet, bij voorkeur ten minste voor de levensduur van de installaties en voorzieningen die ervoor worden ingericht. Als we daarbij uitgaan van een periode van vijftig jaar, is er opslagcapaciteit beschikbaar voor ruim 40 Mton per jaar, of de helft daarvan als opslag onder land ongewenst wordt geacht.

Europees gezien is er volgens de eerste inventarisaties voldoende opslagcapaciteit om de geraamde emissies van grote industriële installaties in West- en Midden-Europa gedurende veel langere perioden te kunnen opslaan. Meer dan de helft van die capaciteit zit in enkele grote aquifers in het Noorse deel van de Noordzee; bij de gehanteerde emissieraming voor Europa zou de capaciteit hiervan in 2050 pas voor 5 procent zijn benut. In een van die aquifers wordt al enkele jaren een relatief kleine stroom CO₂ opgeslagen. Vanuit Nederlands perspectief is deze locatie niet ongunstig; zij ligt op slechts 800 kilometer afstand. Als de veronderstelde capaciteit van deze aquifer daadwerkelijk kan worden benut, hoeft opslagcapaciteit voor Nederland geen beperkende factor meer te zijn. In onze analyses hebben we de opslagcapaciteit gevarieerd tot 100 Mton/jaar.

Over de daadwerkelijke opslagcapaciteit van de beschikbare velden en aquifers bestaat onzekerheid. Er is nog geen ervaring opgedaan met het met CO₂ volpompen van de diepe ondergrond. Ramingen over de opslagcapaciteit van gas- en olievelden zijn vooral gebaseerd op de kennis over en vele ervaringen met het beheer en de benutting van die velden. De effecten van grootschalige CO₂-opslag in aquifers daarentegen zijn alleen in kaart gebracht op basis van simulatiemodellen. Daarom zijn de onzekerheden met betrekking tot de werkelijke opslagcapaciteit in aquifers het grootst.

Elektrificatie en elektriciteitsopwekking zonder CO₂

Voor de opwekking van elektriciteit waarbij geen CO₂ vrijkomt, zijn verschillende technologieën beschikbaar. Windmolens, zonnepanelen en kerncentrales bieden bij een voorzichtige raming samen al een potentiële jaarlijkse productie van 350 PJ (circa 100 terawattuur, TWh); met meer optimisme zou dit zelfs kunnen oplopen tot meer dan het dubbele. De ruimtelijke beperkingen die er zijn, hoeven een grote rol van CO₂-vrije elektriciteitsproductie niet in de weg te staan. Als we er ook in slagen het gebruik van

brandstoffen in de industrie, de gebouwde omgeving en het verkeer steeds meer te vervangen door het gebruik van elektriciteit, dan ligt hierin de basis voor een CO₂-arm energiesysteem.

Met de genoemde technieken is het elektriciteitsaanbod echter beperkt te sturen. Hierdoor kan het potentieel aan elektriciteit dat er is, niet zonder meer worden benut. Wind heeft een grillig aanbodprofiel. De zon is voorspelbaarder dan wind, maar levert in de wintermaanden, als de vraag juist groot is, een beperktere bijdrage. Kernenergie daarentegen biedt een constant aanbod. Hoewel de flexibiliteit van nieuwe generaties kerncentrales naar verwachting groter wordt, is de technologie ongeschikt om vraag- en aanbodwisselingen in korte tijdsperiodes te kunnen opvangen. Deze optie sluit hierdoor minder goed aan bij een hoog percentage zonne- en windenergie. Een aanbod van elektriciteit waarin wind een iets groter aandeel heeft dan zon, geeft een aanbodprofiel dat het beste aansluit op de dag/nacht- en seizoensfluctuatie in het vraagprofiel. Zonne-energie heeft wel het voordeel van kleinschaligheid, zodat iedere burger en elk bedrijf de mogelijkheid hebben om zelf bij te dragen aan de productie van hernieuwbare energie.

Gas biedt wel grote flexibiliteit in het elektriciteitsaanbod, en tegen beperkte kosten. Om die reden wordt in een systeem met weinig stuurbare technieken veelal een zeker aandeel gas wenselijk geacht. Hoe groot dat aandeel moet zijn, hangt weer af van de andere opties, zoals opslag en uitwisseling van elektriciteit met het buitenland.

Met behulp van opslagtechnieken als accu's of door het hoogteverschil in oude mijnen te benutten in combinatie met waterkracht en slimme sturing van de vraag, bijvoorbeeld bij het opladen van elektrische auto's, kan het evenwicht tussen vraag en aanbod op etmaalniveau in Nederland verder worden geoptimaliseerd. Dit biedt echter geen oplossing voor de mogelijke onbalans over langere periodes, met name over de seizoenen.

Oplossingen voor een evenwicht tussen de vraag naar en het aanbod van elektriciteit over de seizoenen wordt momenteel vooral gezocht op Europese schaal, namelijk door het verzoeken en verder koppelen van elektriciteitsnetwerken tussen landen. Het Nederlandse elektriciteitsnetwerk is al gekoppeld aan dat van de buurlanden. Oorspronkelijk bood deze koppeling vooral een noodvoorziening. De afgelopen periode faciliteerde het netwerk ook de Europese markt. Met het perspectief van een groter aandeel hernieuwbare elektriciteit groeit het belang van een Europees netwerk met een nog veel grotere uitwisselingscapaciteit tussen alle landen. Zelfs een koppeling met Noord-Afrika behoort in de toekomst tot de mogelijkheden. Pieken in zowel vraag als aanbod kunnen dan sterk worden afgevlakt en beter op elkaar worden afgestemd, zeker als ook de grootschalige opslagmogelijkheden in bergmeren (*pumped storage*) worden benut.

De capaciteit voor uitwisseling van elektriciteit met de buurlanden zal naar verwachting sterk toenemen. Daarnaast zijn er concrete afspraken over verdere koppeling van het

netwerk tussen de Noordwest-Europese landen. Een volledig hernieuwbare elektriciteitsvoorziening op Noordwest-Europese schaal is echter onwaarschijnlijk. Zowel de vraag- als de aanbodpatronen (bij veel windenergie opgewekt op de Noordzee) verschillen daarvoor op deze schaal te weinig. Daardoor zal er enige onbalans tussen vraag naar en aanbod van elektriciteit blijven; een onbalans die waarschijnlijk onvoldoende kan worden gecompenseerd door elektriciteitsopslag in de bergmeren in Scandinavië. Er lopen op dit moment diverse studies op verschillende schaalniveaus om meer duidelijkheid te krijgen over de mogelijkheden van en de randvoorwaarden voor zo'n systeem.

De betekenis van schone elektriciteitsproductie wordt groter als er tegelijkertijd een verschuiving optreedt in de energievraag van brandstoffen naar elektriciteit. Dat kan met technieken als elektrische voertuigen en elektrische warmtepompen in gebouwen en bedrijven. Ook waterstof kan in zo'n systeem een nuttige energiedrager zijn, omdat waterstof uit elektriciteit kan worden gemaakt en schoon is bij eindgebruik. Een verreгаande verschuiving naar elektriciteit en/of waterstof is technisch gezien in veel sectoren mogelijk. Praktisch gezien is dit voor vele bedrijven zodanig nieuw dat er rekening mee moet worden gehouden dat zo'n verschuiving in 2050 nog slechts in beperkte mate gerealiseerd zal zijn.

In de hier beschouwde oplossingsrichting (elektrificatie en CO₂-vrije elektriciteitsproductie) is het belang van een Europees elektriciteitsnetwerk groot. Hetzelfde geldt voor de medewerking van vele landen aan de realisatie van dat netwerk. Er is een aanvullende optie denkbaar, waarin Nederland voor zijn elektriciteitsvoorziening minder afhankelijk wordt van Europese samenwerking. Gas speelt daarbij een centrale rol. Deze optie is minder nadrukkelijk in beeld, maar kan worden gezien als één oplossing voor drie problemen: de vraag-aanbodbalans van elektriciteit en warmte, de bestemming van afgevangen CO₂ en de opslag van energie. Het overaanbod aan elektriciteit wordt daartoe omgezet in waterstof. Deze waterstof kan direct worden benut of worden bijgemengd in het gasnet (vooral nog wordt daarvoor een maximum van 10 procent aangehouden). Als de waterstof onvoldoende afzetmogelijkheden kent, is verdere omzetting tot methaan ('e-gas') of methanol – door een chemische reactie met afgevangen CO₂ – een mogelijkheid. De meest kritische stap is de productie van waterstof. Het grillige karakter van het aanbodpatroon van elektriciteit verplaatst zich immers naar het elektrolyseproces, waardoor de kosten relatief hoog kunnen zijn.

Verminderen van emissies van overige broeikasgassen

Het energiesysteem omvat niet alle broeikasgasemissies. Er zijn nog andere relevante emissies, vooral van broeikasgassen anders dan CO₂. Emissies van methaan (CH₄) bij veehouderijen en van lachgas (N₂O) door mestgebruik in de landbouw hebben daarin een groot aandeel. De technische mogelijkheden om deze emissies te verminderen zijn relatief beperkt. Met verbeteringen in de melkproductie, het veevoer, het gebruik van meststoffen en door het vergisten van dierlijke mest kunnen de emissies van zo'n 16 Mton (raming 2020) naar 11 Mton CO₂-equivalenten worden teruggebracht. Bij een

gewenste emissiereductie van 80 procent tot een niveau van 45 Mton nemen deze bronnen in 2050 zo'n kwart van de emissieruimte in beslag.

Voor verdergaande emissievermindering is een structurele verandering in de productiestructuur nodig. Vanuit mondiaal perspectief heeft verschuiving van de productie geen zin. Vooral de vermindering en verandering in de consumptie van dierlijke producten zou soelaas kunnen bieden.

De overige niet-CO₂-broeikasgasemissies uit de industrie en afvalverwerking kunnen wel aanzienlijk worden teruggebracht, namelijk tot een restemissie van maximaal 2 Mton CO₂-equivalenten. Belangrijke industriële N₂O-bronnen als de salpeterzuur- en de caprolactamproductie zijn naar verwachting in 2050 vrijwel volledig geëlimineerd. Fluorverbindingen voor toepassingen als koeling en etsen zijn krachtige broeikasgassen. Deze kunnen worden vervangen door minder schadelijke stoffen. De methaanemissies van stortplaatsen nemen geleidelijk af tot bijna nul en die van rioolwaterzuiveringsinstallaties worden aanzienlijk teruggebracht.

Robuuste elementen voor Nederland in 2050

Hoe kunnen de hiervoor besproken bouwstenen voor een schone economie worden gecombineerd tot een compleet energiesysteem dat voldoet aan de emissiereductiedoelstelling? Dat is de volgende stap in onze verkenning. Daartoe zijn analyses uitgevoerd met het door PBL en ECN ontwikkelde model E-Design. Dit model omvat het gehele Nederlandse energiesysteem, inclusief de uitwisseling met het buitenland, en is een hulpmiddel om varianten voor het energiesysteem te ontwerpen voor Nederland in 2050.

Uitgangspunten voor de analyses

Met de analyses willen we het belang in beeld brengen van de vier groepen technische opties die er zijn voor het realiseren van een emissiereductie van 80 procent in 2050. Voor de potentiële inzet van deze vier groepen hebben we verschillende varianten gehanteerd.

De variatie in de energievraag is gebaseerd op de analyses in de paragraaf 'Vermindering van de vraag naar energie'. De energievraag in het referentiebeeld in 2050 is als maximum genomen; daarnaast zijn varianten geanalyseerd waarin de vraag 10, 20 respectievelijk 30 procent lager is.

Voor de voorraad biomassa, de opslagcapaciteit voor CO₂ en de potentiële productie van CO₂-vrije elektriciteitsproductie zijn verschillende varianten opgesteld, van beperkt tot zeer ruim beschikbaar (zie tabel 1). Ook deze varianten volgen uit de analyses in hoofdstuk 4. Daarnaast hebben we varianten doorgerekend waarbij een bepaalde groep van technieken of één specifieke techniek helemaal is weggelaten.

Tabel 1

Verschillende varianten voor de jaarlijkse beschikbaarheid van voorraden en ruimte voor technieken

	Beperkt	Redelijk	Ruim	Zeer ruim
Biomassa (PJ)	250	500	750	1.000
Opslagcapaciteit voor CO ₂ (Mton)	25	50	75	100
Wind, zon, kernenergie (TWh)*	120	190	260	320

* De huidige vraag in Nederland ligt rond de 120 terawattuur.

Een verregaande mate van elektrificatie is een systeemvernieuwing die veel tijd kost. Zelfs wanneer maximaal wordt ingezet op elektrificatie, veronderstellen wij dat in 2050 nog ten minste 20 procent van het wegvervoer zal plaatsvinden met een interne verbrandingsmotor (op basis van benodigde energie), ten minste 20 procent van de warmte voor de gebouwde omgeving uit gas zal komen en ten minste 35 procent van de nu op aardgas draaiende verbrandingsprocessen voor de industrie ook in 2050 (methaan)gas gebruiken. In het Verdiepingsdeel van dit rapport is de gevoeligheid van deze uitgangspunten verder getoetst.

Als gevoeligheidsanalyse is in alle varianten gerekend met zowel een optimistische als een pessimistische ontwikkeling van technieken. Als de haalbaarheid van het doel voor beide ontwikkelingen niet gelijk uitkwam, is zij in de figuren 4, 5, 7 en 8 met een '?' aangeduid.

Doelbereik: afhankelijkheid van beschikbaarheid van voorraden en technologieën

Zijn alle bouwstenen voor een schone economie slechts beperkt beschikbaar, dan lijkt het niet mogelijk het gestelde doel van een emissiereductie van 80 procent in 2050 te halen (zie figuur 4). Bij een redelijke beschikbaarheid komt het doel technisch binnen bereik, al is dit in de varianten met een hogere energievraag nog onzeker. Bij een ruime beschikbaarheid van de bouwstenen lijkt het doel in alle onderzochte vraagscenario's technisch haalbaar.

Een volgende vraag is dan hoe noodzakelijk of robuust de vier bouwstenen zijn om de emissiereductie van 80 procent te kunnen realiseren. Iedere zelfstandige bouwsteen kan leiden tot een vermindering van de emissies met 30 tot 40 procent (voor biomassa uitgaande van een zeer ruime beschikbaarheid van 1.000 PJ). Dit is aanzienlijk, maar niet voldoende. Er zijn dus combinaties nodig. Daarbij hebben we ons voor ieder van de bouwstenen de vraag gesteld of deze zou kunnen worden gemist. Kan een emissieniveau van 45 Mton in 2050 worden gehaald zonder één van de groepen technieken te gebruiken? Daarbij gaan we in de figuren 5, 7 en 8 alleen uit van een ruime of zeer ruime beschikbaarheid van de overige bouwstenen. Uit figuur 4 was immers al

Figuur 4

Haalbaarheid van emissiereductie van broeikasgassen met 80 procent, 2050

Energievraag ten opzichte van referentiebeeld		-30%	-20%	-10%	-0%
Aanbod voorraden en ruimte	Ruim	+	+	+	+
	Redelijk	+	+	?	?
	Beperkt	-	-	-	-

- + Haalbaar
- ? Haalbaarheid onzeker
- Onhaalbaar

duidelijk dat bij een redelijke beschikbaarheid van alle bouwstenen het doel niet gemakkelijk haalbaar is.

Afhankelijkheid van de energievraag

Een emissievermindering met 80 procent is haalbaar bij een energievraag die overeenkomt met die van het referentiebeeld voor 2050. Zelfs als de energievraag nog 10 procent hoger zou liggen dan in het referentiebeeld is dat doel haalbaar, mits de voorraden ruim beschikbaar zijn en er voldoende ruimte is voor schone elektriciteitsproductie. Een vermindering van de energievraag vermindert de afhankelijkheid van deze twee factoren in belangrijke mate (zie ook de figuren 5 tot en met 8).

Afhankelijkheid van biomassa

Zonder de inzet van biomassa lukt het bij de gekozen uitgangspunten in Nederland niet om een emissieniveau van 45 Mton te realiseren, ook niet als de andere groepen van technieken zeer ruim kunnen worden ingezet (zie figuur 5). De restemissies in de landbouw, de emissies in de transportsector (vooral van lucht- en scheepvaart en vrachtverkeer), de restemissies uit de industrie – ook na zoveel mogelijk toepassing van CO₂-afvang – komen, samen met andere kleine bronnen, hoger uit dan die 45 Mton. Zelfs een emissiereductie met 70 procent lijkt zonder biomassa nauwelijks haalbaar.

Dat brengt ons op de vraag hoeveel biomassa er ten minste nodig is om de doelstelling voor 2050 te realiseren. Het antwoord hangt sterk af van de energievraag en van de beschikbaarheid van de andere technieken (figuur 6). Als alle andere bouwstenen tot het uiterste zouden kunnen worden benut, zou een inzet van 200 PJ volstaan. Dit is ruwweg twee keer zoveel als de hoeveelheid biomassa die nu wordt gebruikt, en komt

Figuur 5

Haalbaarheid van emissiereductie van broeikasgassen met 80 procent, zonder de inzet van biomassa, 2050

Energievraag ten opzichte van referentiebeeld		Met verregaande elektrificatie			
		-30%	-20%	-10%	-0%
Aanbod voorraden en ruimte	Zeer ruim	—	—	—	—
	Ruim	—	—	—	—

- + Haalbaar
- ? Haalbaarheid onzeker
- Onhaalbaar

overeen met het potentiële aanbod in Nederland zelf. Het is echter waarschijnlijk dat Nederland afhankelijk wordt van de import van biomassa om het 2050-doel te halen. Zouden de andere bouwstenen slechts in beperkte mate (kunnen) worden benut, dan is er een grote kans dat het aanbod van duurzame biomassa onvoldoende is, zeker als de energievraag relatief hoog blijft.

Afhankelijkheid van CO₂-afvang en -opslag

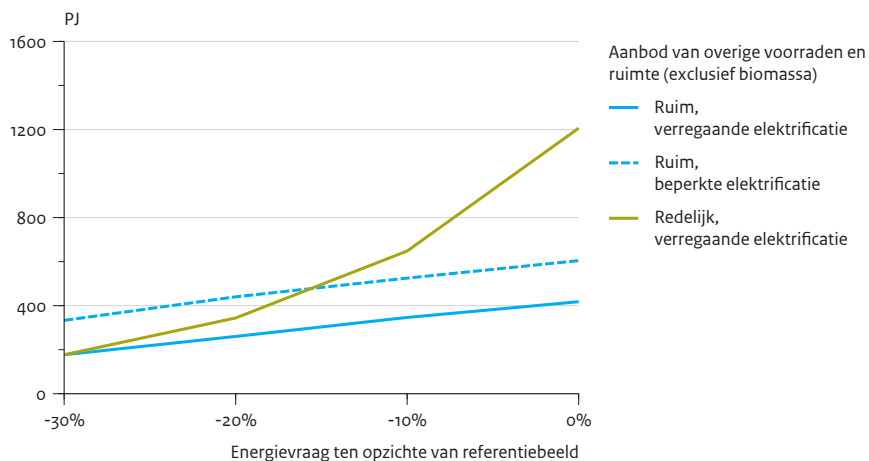
Ook zonder de afvang en opslag van CO₂ is het bijna ondoenlijk om het doel voor 2050 te halen (figuur 7). Als de uiteindelijke emissiereductie in Nederland niet verder zou hoeven gaan dan 70 procent, dan nemen de mogelijkheden toe om dit zonder CO₂-opslag te realiseren. Maar ook dan onder de randvoorwaarden van een ruime beschikbaarheid van de andere voorraden en een verregaande elektrificatie.

Voor afgevangen CO₂ uit industriële bronnen is de opslagcapaciteit in Nederland op zee wellicht net toereikend. Om ook bij elektriciteitscentrales en/of nieuwe biomassaverwerkingsinstallaties CO₂ af te vangen is aanvullende capaciteit nodig.

Afhankelijkheid van CO₂-vrije elektriciteitsproductie

Zonder de inzet van CO₂-vrije elektriciteit uit windmolens, zonnepanelen en kerncentrales (of nog andere technieken) is een vermindering van de broeikasgas-emissies met 80 procent weliswaar mogelijk, maar alleen als er extra energiebesparing ten opzichte van het referentiebeeld wordt gerealiseerd, én als duurzame biomassa en de opslagcapaciteit voor CO₂ in buitenlandse aquifers zeer ruim beschikbaar zijn (figuur 8). Het is vooral de combinatie van biomassa en afvang van CO₂ die de emissiereductie mogelijk maakt. Deze zorgt er namelijk voor dat over de gehele productieketen heen

Figuur 6
Vraag naar biomassa, 2050



Minimaal benodigde inzet van biomassa om te komen tot een emissiereductie van 80 procent bij verschillende veronderstellingen voor andere voorraden (CO₂-opslagcapaciteit, CO₂-vrije elektriciteit).

netto CO₂ uit de lucht wordt verwijderd. Deze negatieve emissies kunnen de restemissies elders in het systeem compenseren.

Conclusie

Als één van de vier groepen technieken – vermindering van de energievraag, inzet van duurzame biomassa, afvang en opvang van CO₂ en CO₂-arme elektriciteitsproductie – geheel buiten het toekomstbeeld zou blijven, wordt het heel erg lastig, zo niet onmogelijk, om in 2050 een emissievermindering met 80 procent te bereiken. De opties binnen de andere groepen technieken moeten dan in verregaande mate worden benut. Het risico dat dit in de praktijk niet zal lukken, is groot. Het aanbod van duurzame biomassa kan tegenvallen. De afhankelijkheid van opslag van CO₂ in enkele grote aquifers buiten Nederland wordt groot, en daarmee is nog maar weinig praktijkervaring opgedaan. Ook neemt dan de afhankelijkheid toe van een Europees elektriciteitsnetwerk, waarvan het succes nog allerm minst zeker is. Het is ook nog maar de vraag of een verregaande vermindering van de energievraag alleen met betaalbare technische maatregelen kan lukken, mede gezien de onzekerheid over de economische groei.

Het is daarom wenselijk aan te sturen op een mix van deze groepen technieken. Zo'n mix maakt ontwikkelingen in de richting van duurzame biomassa, afvang van CO₂, energiebesparing en koolstofvrije elektriciteitsproductie al tamelijk robuust.

Figuur 7

Haalbaarheid van emissiereductie van broeikasgassen met 80 procent, zonder de inzet van CO₂-afvang en -opslag, 2050

Energievraag ten opzichte van referentiebeeld		Met verregaande elektrificatie			
		-30%	-20%	-10%	-0%
Aanbod voorraden en ruimte	Zeer ruim	+	?	-	-
	Ruim	?	-	-	-

- +** Haalbaar
- ?** Haalbaarheid onzeker
- Onhaalbaar

Daarbinnen zijn er nog veel mogelijkheden voor specifieke technieken en toepassingen. Daarover gaat de volgende paragraaf.

Belang van specifieke technieken voor 2050

Om het belang te analyseren van specifieke technieken voor een schone economie in 2050 hebben we een aanpak gekozen die vergelijkbaar is met de hierboven beschreven analyse van de vier hoofdbouwstenen. In een groot aantal doorgerekende varianten zijn we nagegaan of de doelstelling ook kan worden gehaald zonder één specifieke techniek, of zonder de combinatie van twee technieken. Het aantal varianten waarin het zonder de techniek niet lukt de doelstelling voor 2050 te realiseren, is genomen als een maat voor het relatieve belang ervan.

Voorop staat dat de diversiteit aan technische opties zo groot is dat geen van de technieken onmisbaar is. Wel verschillen zij onderling in het belang van hun bijdrage. Hoe groter dat belang, hoe groter het beroep dat zonder zo'n techniek in de praktijk moet worden gedaan op de alternatieven, met de risico's die hiervoor zijn beschreven. In tabel 2 is dit relatieve belang kort toegelicht.

Emissievermindering in de verschillende sectoren

De doelstelling van een emissievermindering voor Nederland met 80 procent in 2050 betekent niet automatisch dat de CO₂-emissie in alle sectoren met hetzelfde percentage terug moet. Bij een emissiereductie van 80 procent zal de verdeling van de emissies over de sectoren in 2050 heel anders zijn dan nu (figuur 9). Deze verdeling geeft een goede indicatie, maar ligt niet vast; er zijn ook varianten met restemissies per sector buiten de aangegeven bandbreedtes.

Figuur 8

Haalbaarheid van emissiereductie van broeikasgassen met 80 procent, zonder elektriciteitsproductie uit wind, zon en kernenergie, 2050

Energievraag ten opzichte van referentiebeeld		Met verregaande elektrificatie			
		-30%	-20%	-10%	-0%
Aanbod voorraden en ruimte	Zeer ruim	+	+	?	?
	Ruim	?	?	-	-

- +** Haalbaar
- ?** Haalbaarheid onzeker
- Onhaalbaar

Bij bovenstaande sectorale emissieveranderingen plaatsen we enkele kanttekeningen. Ten eerste kent een geheel nieuw systeem ook veel nieuwe processen. Zo hebben processen waarbij biomassa wordt verwerkt tot groen gas of biobrandstof en de productie van waterstof veel invloed op de emissie van broeikasgassen, zeker als deze processen worden uitgerust met CO₂-afvang en dus negatieve emissies opleveren. De toedeling van deze processen aan de sectoren is van belang voor de verdeling van de emissies over die sectoren. In figuur 9 is de productie van groen gas en waterstof toegedeeld aan de energiesector; de productie van vloeibare biobrandstoffen is toegedeeld aan de industrie en de raffinaderijen.

Ten tweede zijn de verbrandingsemissies bij het gebruik van groen gas of biobrandstof op nul gesteld. De emissies die optreden bij de productie van biomassa, zijn bij dit eindgebruik dus niet meegewogen. De aanzienlijke CO₂-emissies in 2050 voor de sector verkeer en vervoer hebben te maken met onvoldoende aanbod van biomassa voor de volledige vervanging van de fossiele brandstoffen en met de – naar verwachting – nog geringe rol van elektriciteit en waterstof voor de lucht- en scheepvaart.

Directe kosten en economische effecten

Er zijn diverse technische varianten voor een CO₂-arm Nederland. We kunnen daarbij meer en minder robuuste elementen onderscheiden. Lastiger is het de betaalbaarheid van zo'n toekomstig systeem te beoordelen. Het jaar 2050 is immers te ver weg om harde uitspraken te kunnen doen over de kosten van nieuwe technieken en de daarbij benodigde infrastructuur. Die kosten zullen na het doorlopen van de leercurve naar verwachting lager liggen dan nu. Soms zullen zij zelfs aanzienlijk lager zijn, doordat de technologie fundamenteel verbetert, er meer ervaring in de praktijk mee wordt opgedaan en de technologie op grotere schaal wordt toegepast. Voor de analyses gaan

we uit van zowel pessimistische als optimistische inschattingen van de toekomstige kosten en rendementen van technieken. Nog lastiger is het om de grondstofprijzen in 2050 te schatten, zowel voor fossiele brandstoffen als voor biomassa. Voor de kosten van diverse technieken en voor toekomstige brandstofprijzen hebben we gebruik gemaakt van de *Energy Technology Perspectives 2010* van het IEA. De prijzen zijn afhankelijk van het gekozen scenario (minder gebruik van fossiele grondstoffen leidt tot lagere prijzen voor die grondstoffen). Hoewel er dus veel onzekerheden zijn, kunnen we toch enkele effecten aangegeven.

Het is waarschijnlijk dat een economie met een schoon energiesysteem hogere kosten met zich brengt dan een economie waarin de huidige technologie gehandhaafd wordt (figuur 10). De geschatte meerkosten in 2050 liggen in de orde van 10 miljard euro. De onzekerheidsmarge daarbij is echter groot. Leiden de leerprocessen van nieuwe technieken tot zeer gunstige resultaten, dan kan het met die meerkosten erg meevallen en zou het toekomstige systeem zelfs iets goedkoper kunnen zijn dan het huidige. Robuust is wel de verschuiving naar minder kosten voor grondstoffen – en daarmee ook minder afhankelijkheid van die grondstoffen – en naar meer kapitaalslasten. Deze verschuiving is het sterkst bij een belangrijke rol van hernieuwbare energie en energiebesparing. Toepassing van afvang en opslag van CO₂ leidt in alle gevallen tot extra directe kosten, omdat het een toegevoegde techniek betreft waarvoor ook extra energie nodig is.

In deze studie beperken we ons tot de directe kosten van een schoon energiesysteem. Een mondiale aanpak van klimaatverandering vermindert de negatieve externe effecten van klimaatverandering op de leefomgeving en de economie. Deze baten zijn in deze studie niet in geld uitgedrukt.

Bij een analyse van de economische effecten gaat het uiteraard niet alleen om de kosten in 2050. Het gaat nog meer om de kosten in de aanloop daarnaar toe. Hoewel de benodigde transitie veel bedrijven ook kansen biedt, zeker omdat het internationale ontwikkelingen betreft, kunnen de kosten aanzienlijke barrières opwerpen. Voor een belangrijk deel hebben die barrières te maken met de leerprocessen voor nieuwe technieken, die nu nog relatief duur zijn. Leerkosten voor nieuwe, schone technieken zijn mondiale kosten, vooral als het gaat om de ontwikkeling van de technologie zelf en de productietechnologie daarvoor. Nederland hoeft niet op alle punten de leerkosten zelf op te brengen. Het gaat er dan om speerpunten te kiezen waarop Nederland aan deze leerprocessen wil bijdragen. Op andere terreinen kunnen de resultaten van zulke leerprocessen later worden ingekocht. Er moet echter ook ervaring worden opgedaan met de inpassing van de nieuwe technologie in het systeem en het onderhoud daarvan. Dergelijke leerprocessen moeten in Nederland zelf worden doorgemaakt.

Tabel 2

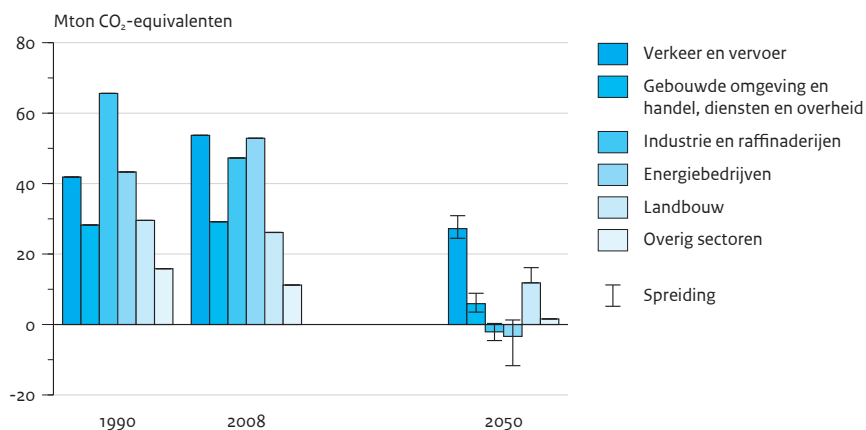
Vergelijking van het belang van de beschikbaarheid van technieken voor een schone economie in 2050

Technologie	Relatief belang	Toelichting
Wind op land	Beperkt	De technologie past prima in het eindbeeld, maar het potentieel voor Nederland is beperkt verondersteld, waardoor het achterwege laten van deze optie met andere technieken kan worden opgevangen.
Wind op zee	Groot	De technologie past prima in het eindbeeld en heeft een groot potentieel. Het achterwege laten van de optie zet veel druk op ofwel import van schone elektriciteit ofwel het sterk vergroten van het aandeel kernenergie.
Zon-PV	Beperkt	De technologie past bij beperkte omvang goed in het eindbeeld. Het heeft echter (meer dan wind) beperkingen bij de aansluiting van vraag en aanbod.
Kernenergie	Groot	De technologie past prima in het eindbeeld en heeft een groot potentieel. Het achterwege laten van de optie kan worden opgevangen met wind- en zonne-energie (aanvullende oplossingen voor vraag-aanbodbalancering zijn dan nodig).
Gascentrales met CCS	Beperkt	Het belang daarvan wordt aanzienlijk groter, als er geen Europees elektriciteitsnetwerk komt met grote uitwisselingscapaciteit. Wel hebben gascentrales een groot belang om flexibele capaciteit te leveren.
Kolencentrales met biomassa-meestook en CCS	Zeer beperkt	Hoewel het een vorm van elektriciteitsproductie is met lage, soms zelfs negatieve emissies, zijn er ook schone alternatieven en op systeemniveau veel varianten waarbij biomassa en CO ₂ -capaciteit beter voor de productie van brandstoffen of groen gas kunnen worden ingezet.
Warmte uit geothermie	Beperkt	De technologie past prima in het eindbeeld, maar het potentieel voor Nederland is beperkt, waardoor het achterwege laten van deze optie met andere technieken kan worden opgevangen.
Zonnewarmte	Beperkt	De technologie past goed in het eindbeeld, maar het potentieel voor Nederland is erg beperkt, omdat er vooral aanbod in de zomer is en voor de winter aanvullende technologie nodig is.
Elektrische warmtepompen	Groot	Deze technologie heeft een belangrijk aandeel in de elektrificatie bij de industrie, tuinbouw en in de gebouwde omgeving, waarmee de benutting van schone elektriciteit wordt versterkt.
Micro-WKK op waterstof	Beperkt	Waterstof kan ook uit elektriciteit worden gemaakt, maar als de waterstof wordt gebruikt om daaruit weer elektriciteit te produceren, dan leidt dit tot veel energieverlies. Het zou alleen van nut zijn als waterstof als opslagmedium fungeert (niet voor de hand liggend) of bij productie uit biomassa.
Micro-WKK op methaangas	Zeer beperkt	Decentrale elektriciteitsopwekking, waarbij aardgas wordt ingezet, levert geen emissievermindering als de centrale elektriciteitsproductie (vrijwel) emissievrij is; lokale toepassingen op biogas kunnen een nuttige aanvulling zijn.

Tabel 2 (vervolg)

Technologie	Relatief belang	Toelichting
Biomassa-vergassing voor brandstoffen (+CCS)	Zeer groot	Productie van biobrandstoffen (groen gas, transportbiobrandstof) is cruciaal voor bronnen met weinig schone alternatieven. Als pluspunt levert biomassaverwerking met afvang van de bij het proces vrijkomende CO ₂ negatieve emissies.
Elektrische auto's	Groot	Dit type voertuigen kan een belangrijk aandeel hebben in de elektrificatie en daarmee in de rol van schone elektriciteit, mede door flexibiliteit bij het opladen.
Waterstof-auto's	Groot	Deze voertuigen vormen eventueel een alternatief voor elektrische voertuigen, maar hebben wellicht grotere betekenis als aanvullende optie voor wegverkeer over lange afstanden, zoals ook vrachtverkeer.
CCS industriële emissies	Groot	Voor veel processen zijn er geen alternatieven of zijn de alternatieven met grote onzekerheid omgeven.

Figuur 9
Emissie van broeikasgassen per sector



Verdeling van de broeikasgasemissies over de sectoren in 1990, 2008 en 2050 als resultaat van verschillende varianten (het totaal voor 2050 ligt 80 procent lager dan voor 1990).

Belangrijke stappen in leer- en implementatietrajecten

Robuust of niet robuust is geen kwestie van zwart of wit. Naarmate het belang van een nieuwe technologie voor een schone economie in 2050 groter is, biedt dat een sterke basis voor het implementatietraject van de technologie. Voor de iets minder robuuste onderdelen zullen eerst vragen moeten worden beantwoord, voordat keuzen kunnen

worden gemaakt over grootschalige toepassing van de technologie. De te volgen route krijgt dan sterk het karakter van een leertraject.

Een technologie is meer dan een installatie of apparaat. Rond een technologie of een technologisch concept is een systeem nodig met productieketens, infrastructuur en nieuwe vormen van organisatie. Deze nieuwe deelsystemen zouden onderdeel kunnen worden van het toekomstbeeld. De routekaart voor 2050 zou op het niveau van dergelijke deelsystemen de belangrijkste stappen kunnen of moeten omvatten op weg naar realisatie. Voor enkele deelsystemen geven we een beeld van de mogelijke stappen. Het accent ligt daarbij op de voor het komende decennium te zetten stappen.

Eerste stappen op de route

We geven enkele voorbeelden van mogelijke acties tussen nu en 2020 om te laten zien hoe concreet een routekaart de komende jaren kan worden. Sommige stappen zijn gericht op de implementatie van robuuste opties, andere op uitbreiding van kennis over mogelijke opties.

Bio-energie

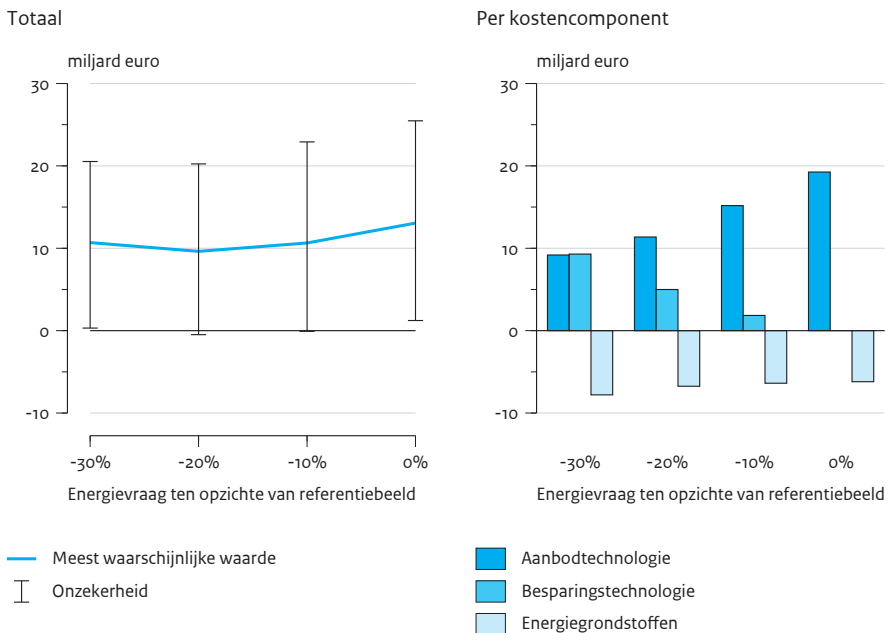
- Benutting van het potentieel voor vergisting.
- Duurzaamheidscriteria voor biomassa en alle typen biobrandstoffen (gas, vloeibaar en vast), voor zowel directe als indirecte effecten.
- Voortzetten van het onderzoek naar de optimalisatie van processen en de evaluatie van demonstratieprojecten (wat zijn de meest kansrijke routes voor schaalvergroting?).
- Voorbereiding van de grootschalige verwerking van te importeren biomassa (vooral droog, houtachtig materiaal) tot transportbrandstof en/of groen gas. Zaken die daarbij aan de orde komen zijn bijvoorbeeld locatiekeuze, technologiekeuze (wellicht vergassing), contracten over het biomassa-aanbod, vergunningen en de bestemming van af te vangen CO₂.

CO₂-afvang en -opslag

- Keuze voor de opslaglocaties. Voor opslag onder zee gaat het om het Nederlandse deel van de Noordzee, met veel kleine velden en een complexe infrastructuur en/of om opslag in Noorse aquifers. Aandachtspunt daarbij is de aanleg van een pijpleiding die ook door andere Europese landen kan worden benut.
- Contracteringsfase. Bedrijven hebben zekerheden nodig om tot investeringen over te gaan. Bedrijven die broeikasgassen uitstoten, moeten de zekerheid hebben dat zij de CO₂ voor een bepaalde prijs kunnen afleveren. Bedrijven die overwegen te investeren in transportsystemen (zoals pijpleidingen) of opslagfaciliteiten, willen zekerheid over voldoende aanbod.
- Onderzoek naar en praktijktesten met innovatieve afvangtechnologie.
- Nieuwe gascentrales (net als kolencentrales) *capture ready*; dat wil zeggen dat de installaties geschikt worden gemaakt voor de afvang van CO₂.

Figuur 10

Meerkosten voor emissiereductie van broeikasgassen met 80 procent ten opzichte van referentiebeeld met huidige aanbodtechnologie, 2050



Verandering in de maatschappelijke jaarlijkse kosten (in miljard euro2010) van een CO₂-arm systeem ten opzichte van een toekomstig systeem met dezelfde technologie als in de huidige situatie. De onzekerheidsmarge in de totale kosten weerspiegelt het verschil tussen een optimistische en een pessimistische kostenontwikkeling van schone technologie.

- Demonstratieprojecten en praktijkproeven met al bij de industrie beschikbare CO₂-stromen.

Windenergie

- Verder realiseren van het potentieel aan windenergie op land, mede om bij te dragen aan een verdere kostendaling van de technologie. Lokaal initiatief en lokaal draagvlak zijn van belang.
- Geleidelijke uitrol van windenergie op zee, met voortgang van het leerproces zonder een explosieve groei van de kosten. Deze uitrol draagt bij aan de opbouw van betrokken sectoren, de Nederlandse offshore-sector, havenbedrijven en toeleverende bedrijven.
- Centrale verzameling van basisgegevens door de overheid (zoals windsnelheid, effecten op natuur en milieu). Hierdoor nemen de voorinvesteringskosten van projecten af.

- Ruimtelijke ordening op zee met internationale afstemming.
- Regelen netbeheer op zee.
- Voorbereiden van de inpassing van een groot aandeel hernieuwbare elektriciteit in het elektriciteitsnetwerk door de koppelingen tussen de netwerken op Europese schaal te versterken en door een goede balans in de opwekking met verschillende technieken in Europa.

Isolatie, warmtepompen en zonnecollectoren bij bestaande woningen

- Warmtepompen en balansventilatie eerst toepassen in nieuwbouw om hiermee ervaring op te bouwen bij aannemers, installateurs, eigenaren en verhuurders.
- Isolatieprogramma's starten om renovatiemomenten te kunnen benutten en een gemiddeld isolatietempo te realiseren van circa 150.000 woningen per jaar.
- Implementeren van slimme financieringsconstructies voor woningverbetering.
- Actief benaderen van particuliere woningeigenaren om kennis aan hen over te dragen.
- Voortzetten van onderzoek naar seizoensopslag van zonnewarmte.

Deze voorbeelden laten zien dat er naast technische ook institutionele aandachtspunten zijn voor de routekaart naar een schone economie. Met deze voorbeeldstappenplannen zijn we allerminst volledig. Het is dan ook niet de bedoeling van dit rapport om de routekaart tot in detail uit te stippelen. De uitwerking van een routekaart is uiteindelijk een zaak van alle betrokken partijen: bedrijven, burgers, onderzoeksinstellingen en overheden. Daarin kunnen ook stappen voor na 2020 worden geschetst, al zullen deze voor een deel afhangen van de resultaten van de leertrajecten. De routekaart behoeft daarom met enige regelmaat herijking. Evaluatie van de voortgang, beleidsontwikkeling in binnen- en buitenland en de consequenties van nieuwe inzichten in potentiële en kosten van voorraden en technieken worden dan vertaald in nieuw te nemen stappen.

Benodigde termijnen voor transities

Hoeveel haast is er met het zetten van de genoemde stappen? Zijn veel van die stappen direct nodig of kunnen zij wachten tot na 2020? We hebben immers nog veertig jaar te gaan voor de benodigde transitie. Er zijn doelstellingen geformuleerd voor CO₂-emissies en hernieuwbare energie in 2020. Enkele van de hiervoor aangegeven stappen passen bij het op kosteneffectieve wijze realiseren van die doelen (wind op land, vergisting, biobrandstoffen uit afvalolie); veel andere zijn daarvoor niet noodzakelijk. Betekent dit dat die stappen pas na 2020 hoeven worden gezet?

Grootschalige introductie van nieuwe technologie kost tijd. Natuurlijk zijn er 'snelle' voorbeelden, zoals de mobieltjes (toch nog twintig jaar na de eerste niche) of – in een iets verder verleden maar dichterbij het onderwerp – het centrale Nederlandse gasnet, dat er binnen tien jaar kwam. Wat maakt dat sommige innovaties zo snel doorwerken en andere niet? Als technologische vernieuwing de consument iets extra's biedt, nieuwe functies of een groter gebruiksgemak, dan wil iedereen het nieuwe product snel

hebben. Bovendien gaat het daarbij vaak om privaat rendabele investeringen. Ook als er geen al te grote kapitaalvernietiging optreedt en een ondernemer voor het succes van zijn nieuwe product niet afhankelijk is van andere bedrijven of de overheid, biedt dat gunstige voorwaarden voor een snelle verandering.

Bij veel van de beschouwde systeeminnovaties zijn de condities veel minder gunstig. Neem het voorbeeld van de elektrische auto. Daarmee lijken we niet vast te zitten aan afschrijvingstermijnen van veertig jaar of meer, zoals bij grote installaties of gebouwen die met het oog op 2050 nu al tot keuzen nopen. Toch zal de autoverkoop tussen 2035 en 2040 al een weerspiegeling moeten zijn van het gewenste autopark in 2050. Een explosieve groei van de vraag naar dit soort auto's op korte termijn is ongewenst, gezien hun nu nog hoge prijs. Voor het leertraject in de eerste tien jaar past een toename van het aantal elektrische auto's tot hooguit enkele procenten van alle nieuw verkochte auto's. Zou dat leertraject pas na 2020 starten, dan moet de sprong van enkele procenten naar vele tientallen procenten binnen tien jaar worden gemaakt. Daarvoor moeten accufabrieken uit de grond worden gestampt en fabrieken voor verbrandingsmotoren worden afgeschreven. De accufabrieken zullen hun capaciteit echter geleidelijk uitbreiden, omdat ze afhankelijk zijn van het lithiumaanbod op de markt en ze de prijs niet willen opdrijven. Autofabrikanten letten er ondertussen op of hun potentiële klanten wel oplaadfaciliteiten hebben. Die oplaadpalen komen er echter niet als de elektrische auto's niet overal in de showrooms staan. Dergelijke onderlinge afhankelijkheden leiden ertoe dat het veranderingsproces vele jaren beslaat. Het veranderingsproces zou een grote versnelling kunnen krijgen als iedereen per se een elektrische auto wil hebben. Vooral de beperkte actieradius van de auto zal veel autokopers echter doen aarzelen, nog los van de prijs. Zelfs een voortvarende aanpak vanaf nu geeft geen garantie dat 2050 niet te vroeg komt om het potentieel van elektrisch rijden te kunnen benutten.

Elk deelsysteem heeft uiteraard een eigen verhaal. De onderlinge afhankelijkheden echter herkennen we ook bij andere deelsystemen. Vervanging van bestaande installaties en de infrastructuur eromheen speelt ook een grote tijdsbepalende rol, zoals bij elektriciteitscentrales of bij de vervanging van olieraffinaderijen door installaties voor de productie van vloeibare biobrandstoffen. In de meeste gevallen krijgt de consument geen beter, maar hetzelfde of een vergelijkbaar product: elektriciteit, warmte of brandstof, en wordt het technische systeem er niet eenvoudiger op. De koplopers hebben genoeg wil tot veranderen om door te zetten, maar het zal niet vanzelf leiden tot een grote vraag naar het schonere product, en daarmee tot een snelle introductie. Reden genoeg om geen tijd te verliezen.

Veelvoorkomende barrières en de mogelijke overheidsrol

In de paragraaf 'Eerste stappen op de route' hebben we een aantal stappen voor de korte termijn benoemd die belangrijk zijn voor de gewenste transitie naar 2050.

Sommige daarvan zijn echter niet nodig als het erom gaat de doelstellingen voor CO₂-emissies of hernieuwbare energie in 2020 te halen. Bij een kostenefficiënte aanpak alleen gericht op de genoemde doelen voor 2020 vallen veel nieuwe technieken voorlopig buiten de boot. Een algemeen gestelde doelstelling geeft onvoldoende impulsen aan het transitieproces. Er zijn ook diverse acties in gang gezet, zowel in het beleid als bij de stakeholders, die niet direct gericht zijn op het halen van de 2020-doelen. Voor de energietransitie zijn dit belangrijke initiatieven. Of het tot een voldoende snelle transitie leidt, is niet beoordeeld. In dit rapport hebben we geen beleidsanalyse uitgevoerd, mede omdat – met de routekaart en bijvoorbeeld de *Green Deal* – nog vorm wordt gegeven aan dit aanvullende beleid. Voor het evalueren van de voortgang van het klimaatbeleid is het gewenst om naast de realisatie van de doelstellingen voor 2020 ook andere voor de lange termijn relevante ontwikkelingen mee te nemen.

Verschillende barrières kunnen de benodigde systeeminnovatie in de weg staan. We herkennen daarbij enkele vergelijkbare typen barrières bij de verschillende deelsystemen. Deze zijn kenmerkend voor transitieprocessen. Ze worden kort toegelicht, waarbij de mogelijke rol van het beleid wordt aangestipt.

Het zwarte gat tussen subsidies en algemene normering

In vergelijking met de technieken die de basis vormen van het bestaande systeem, zijn de alternatieve, nieuwe technieken in de beginfase van hun ontwikkeling duur. Een windmolen op zee of een zonnepaneel kan in de kosten nog niet op tegen een nieuwe kolen- of gascentrale. Hetzelfde geldt voor een warmtepomp tegenover een HR-ketel, een elektrische auto tegenover een auto op benzine, of groen gas tegenover aardgas. Wél is met deze nieuwe technieken nog flink wat vooruitgang te boeken. De lessen van vergelijkbare leerprocessen uit het verleden laten zien dat de prijs daalt naarmate de techniek vaker wordt toegepast (tenzij de omstandigheden ongunstiger worden, zoals bij windparken steeds verder op zee).

Onderzoeksprogramma's of demonstratieprojecten van nieuwe technieken worden in veel gevallen met subsidieprogramma's ondersteund. Dan zit een techniek nog in de beginfase van de ontwikkeling, is de kwantitatieve bijdrage aan het energiesysteem nog verwaarloosbaar en zijn de leerkosten in absolute zin beperkt.

In een beleidsveld met algemeen geformuleerde taakstellingen en normen is het aan de markt om de beste technieken te kiezen om invulling te geven aan die taakstellingen en normen. Het emissiehandelssysteem (ETS) met een emissieplafond is in dit verband een belangrijk voorbeeld. De markt selecteert de kosteneffectieve oplossingen. Technieken die in de eindfase van hun ontwikkeling zijn, krijgen op basis van de bereikte prijs-prestatieverhouding hun plaats in het systeem.

Daartussen echter zit een moeilijke fase voor nieuwe technieken. De in het leerproces gewenste schaalvergroting leidt in deze fase tot dermate hoge kosten dat de ontwikkeling te duur wordt voor overheidssubsidies. Daarbij komt dat de prijs van de

techniek nog zo hoog is dat deze in het marktspel geen kans maakt. Deze tussenfase wordt ook wel de 'valley of death' genoemd omdat veel technieken daarin blijven steken.

De vraag welk beleid het meest geëigend is om technologieën door deze fase heen te helpen, is moeilijk te beantwoorden. Opties voor dergelijk beleid zijn meer duidelijkheid geven over op termijn geleidelijk strenger wordende taakstellingen, techniek-specifieke normen met een beperkte omvang en de verdeling van meerkosten over de eindgebruikers, zoals bij een feed-in-systeem, eveneens met een omvang passend bij een leertraject.

Veel kapitaal nodig, lange terugverdientijden

Veel investeringen in de sfeer van energiebesparing of hernieuwbare energie hebben een terugverdientijd die korter is dan de levensduur van de installatie of het gebouw. Ze vormen vanuit maatschappelijk oogpunt een aantrekkelijke optie – op papier. Uit het perspectief van de potentiële investeerder kunnen diezelfde terugverdientijden als te lang worden beoordeeld. Huiseigenaren kijken niet naar de levensduur van hun woning en zien bovendien vooral de last van zo'n verbouwingsproject. Bedrijven wegen de investering af tegen andere investeringen met een mogelijk hoger rendement. Bovendien is kapitaal onder de huidige omstandigheden schaars en zijn investeringen in nieuwe technologieën vaak relatief risicovol. Dat maakt dat er krachtiger impulsen of nieuwe financieringsconstructies gewenst zijn.

Kip-eisituaties en afhankelijkheden

Systeeminnovatie verschilt van procesinnovatie vooral in de veelheid van veranderingen en de onderlinge afhankelijkheid. Een voorbeeld. Geen biomassaverwerker zonder het perspectief op voldoende aanbod en geen biomassa-aanbieder zonder perspectief op verwerking. Daarbij zijn ook transporteurs nodig van biomassa en biobrandstoffen, met alle faciliteiten rondom zo'n transportsysteem. Een tweede voorbeeld. Geen afvang van CO₂ zonder bedrijven die CO₂ kunnen transporteren en bedrijven die het willen opslaan. Andersom, geen bedrijven die investeren in CO₂-opslag zonder de garantie op CO₂-aanbod.

Dergelijke situaties vragen bij uitstek om zekerheid over de toekomstige markt. Die zekerheid kan de overheid creëren. Soms kan zij (eventueel tijdelijk) in een publiek-private samenwerking meehelpen om de uitvoering over de eerste drempels te brengen. Samenwerking met de ons omringende landen kan daarbij voordelen bieden, omdat het gezamenlijk leervermogen dan groter zal zijn en het beleidsinstrumentarium beter kan worden afgestemd. Hierdoor wordt bovendien de duidelijkheid naar stakeholders groter.

De routekaart van het kabinet kan een instrument zijn om voor alle partijen in ieder geval de gewenste duidelijkheid te vergroten over de te volgen weg naar een schone economie in 2050.

VERDIEPING

VERDIEBING

Inleiding

1.1 De internationale beleidscontext van de klimatroutekaart

De Europese Raad heeft ingestemd met een langetermijnambitie om broeikasgasemissies in 2050 terug te brengen met 80 tot 95 procent ten opzichte van 1990. Hiermee volgt de EU de bevindingen van het IPCC: om de mondiale temperatuurstijging tot 2°C te beperken, moeten de geïndustrialiseerde landen hun emissies in 2050 met 80 tot 95 procent hebben teruggebracht. Met deze ambitie kijkt de Europese Commissie verder dan haar huidige voor 2020 overeengekomen doelstellingen: broeikasgasemissiereductie van 20 procent ten opzichte van 1990, een aandeel van 20 procent hernieuwbare energie in de energiemix, en een (niet bindende) vermindering van het energiegebruik met 20 procent ten opzichte van de ‘business as usual-trend’.

Voor de emissiereductie heeft de Europese Commissie een ‘klimatroutekaart’ opgesteld. Die klimatroutekaart is een verkenning van de mogelijkheden om binnen Europa een emissiereductie van 80 procent in 2050 te realiseren (EC 2011a). De verkenning is gebaseerd op projecties met behulp van scenarioanalyses; daarbij zijn aannames gedaan over de olieprijsontwikkeling en de mate van technologische innovatie, tegen de achtergrond van een toenemende wereldbevolking, groei van het bnp en trends in klimaatverandering en energiegebruik. De klimatroutekaart, die is voorbereid door DG Klimaatbescherming, sluit aan bij de ambitie van de EU 2020-strategie voor slimme en duurzame economische groei in de EU (EC 2010).

Met de klimatroutekaart wil de Europese Commissie een proces in gang zetten om te komen tot nieuwe strategieën voor emissiereductie na 2020. De routekaart geeft aan wat de opgave is voor de verschillende economische sectoren. Dit is een belangrijk aandachtspunt in het sector- en technologiebeleid. De Commissie vraagt de lidstaten snel nationale routekaarten op te stellen om tot een coherente Europese aanpak te komen.

Het kabinet-Rutte heeft het initiatief genomen om ook te komen tot een routekaart waarin geschetst wordt hoe een vergaande emissievermindering van broeikasgassen in 2050 gerealiseerd zou kunnen worden in Nederland. In dit rapport leveren we hiervoor de bouwstenen.

Eind 2011 zal de Commissie ook een energieroutekaart 2050 uitbrengen, waarvan de voorbereiding gebeurt door DG Energie. Deze spitst zich toe op de energiesector. Omdat vermindering van broeikasgasemissies voor een belangrijk deel in de energiesector moet worden gerealiseerd hangen deze beide routekaarten nauw samen. In de energieroutekaart krijgen naast koolstofarme economie ook voorzieningzekerheid en het concurrentievermogen nadrukkelijk aandacht, evenals investeringen in energie-infrastructuur.

1.2 De doelstelling van deze studie

PBL, ECN en TNO zijn door het ministerie van Infrastructuur en Milieu gevraagd om het proces te ondersteunen om tot een nationale routekaart te komen. Dit rapport is daarvan het resultaat, waarin we een overzicht geven van de verschillende mogelijkheden en beperkingen. Voor deze analyse is uitgegaan van 80 procent vermindering van de emissie van broeikasgassen, ook in Nederland, hoewel we ons realiseren dat er nog geen doelstellingen per land zijn en het ook wat minder of meer zou kunnen worden. Maar in alle gevallen betekent het een zeer forse vermindering. Waar het zinvol is, worden ook de mogelijkheden voor 70 procent of 90 procent vermindering getoetst.

Dit rapport heeft daarmee het karakter van een verkenning van de route of – beter nog – van verschillende mogelijke routes naar verschillende mogelijke eindbeelden. In die eindbeelden beschouwen we vooral de technische mogelijkheden. Alle sectoren worden meegenomen, maar we leggen het accent bij het energiesysteem, omdat het leeuwendeel van de broeikasgasemissies daaraan gerelateerd is. Daarbij wordt Nederland nadrukkelijk in een internationale context geplaatst, omdat de mogelijkheden en beperkingen voor een deel in de internationale uitwisseling liggen.

De doelstelling van deze verkenning is om de verdere uitwerking van de routekaart door de vele betrokken maatschappelijke partijen inclusief de overheid te ondersteunen en te prikkelen. De routekaart kan worden gezien als het te volgen traject naar 2050 om het

doel te realiseren met een stappenplan in de tijd. Voor de korte termijn kunnen die stappen met concrete acties worden ingevuld. Voor de wat langere termijn hangen de vervolgstappen af van de geboekte resultaten. In die zin is het ook een zoektocht, waarbij gaandeweg meer kennis, inzichten en ervaringen, de uitvoerende partijen ondersteunen bij het kiezen van de weg.

De technische opties worden beoordeeld op hun bijdrage aan vermindering van de broeikasgasemissies en hun betaalbaarheid. Technieken kennen nog vele andere voors en tegens, zoals de risico's van kernenergie en het beheer van kernafval, risico's van ondergrondse opslag van CO₂, effecten op de natuur van windmolens en het geluidsniveau van elektrische auto's. Deze neveneffecten komen in dit rapport niet aan de orde.

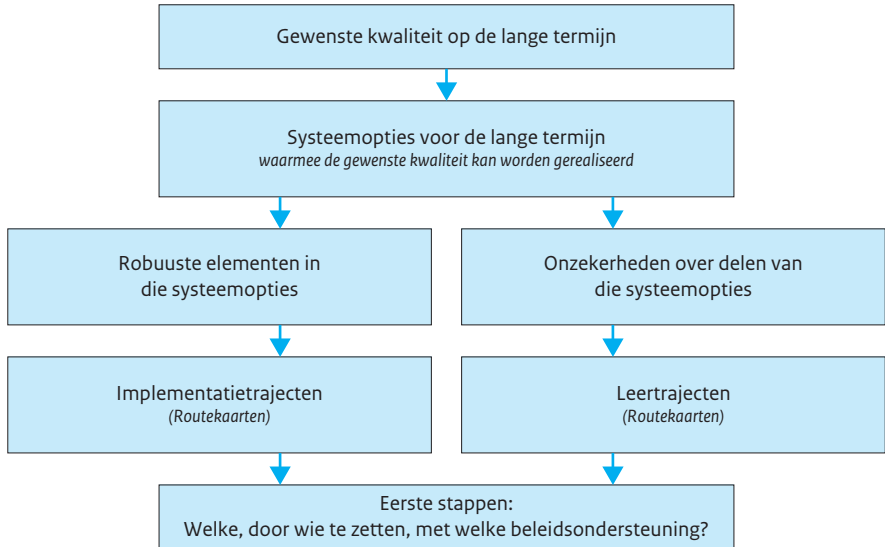
1.3 Methodische aanpak: backcasting

We volgen in dit rapport de methodiek van backcasting. Dat is meer dan zeggen dat er op de lange termijn een CO₂-arme maatschappij moet zijn of een klimaatneutrale stad of – nog breder en mooier – een duurzame mobiliteit of duurzame landbouw, om vervolgens over te gaan tot de orde van de dag. Het vraagt meer concreetheid, om enerzijds een lonkend perspectief te creëren en anderzijds duidelijkheid te bieden over wat daar allemaal voor moet gebeuren, ook op de korte termijn. In figuur 1.1 staat schematisch de stapsgewijze aanpak van de backcastingsmethodiek die we in dit rapport volgen.

Backcasting begint met het doel: de op de lange termijn gewenste kwaliteit of kwaliteiten. In lijn met het doel van de Europese routekaart is het streven naar een niveau van broeikasgasemissies in Nederland dat in 2050 80 procent lager ligt dan in 1990. De concreetheid van deze doelstelling biedt houvast voor de zoektocht naar mogelijkheden om aan die gewenste kwaliteit te voldoen. Er zijn nog andere kwaliteitswensen voor 2050 die niet los kunnen worden gezien van de broeikasgasdoelstelling, omdat ze eveneens met het energiesysteem verbonden zijn. Betaalbaarheid van het energiesysteem, energiezekerheid met minder afhankelijkheid van slechts enkele landen voor olie en gas, benutting van het verdienpotentieel en behoud van biodiversiteit zijn daarvan voorbeelden. Deze worden in dit rapport wel aangestipt, maar de kwantitatieve doelstelling voor broeikasgasemissies is het primaire uitgangspunt voor de analyses.

De CO₂-emissies van lucht- en scheepvaart zijn hierbij meegenomen. Hoewel deze voor een groot deel buiten het huidige beleidsregime vallen, dragen ze net zo goed bij aan de klimaatproblematiek als de emissies van andere sectoren. In deze studie gaat het niet om toetsing van een nationaal beleidsdoel. Het is een verkenning van de mogelijkheden om klimaatverandering te beperken door vermindering van broeikasgasemissies. Het is dan belangrijk alle relevante bronnen mee te nemen, ook die van het Nederlandse

Figuur 1.1
Methodiek van backcasting en de te volgen stappen



aandeel in lucht- en scheepvaart, ook al blijven ze niet binnen de Nederlandse grenzen. Voor 1990 brengt dat de referentie-emissie op 223 megaton (Mton) CO₂-equivalenten. Dat betekent voor 2050 een emissiedoel van 45 Mton CO₂-equivalenten.

Hoe zou de Nederlandse maatschappij, of een deel daarvan zoals het energiesysteem, er in 2050 uit kunnen zien met een zo veel lagere broeikasgasemissie? Er zijn vele technische opties, ook met beperkingen. Hoe zijn ze samen te voegen, wat zijn de systeemopties? Er zijn ook institutionele mogelijkheden en randvoorwaarden. We geven in dit rapport geen blauwdruk voor Nederland in 2050. Evenmin stippelen we één kosteneffectief pad uit voor een periode van 40 jaar. Daarvoor zijn er te veel onzekerheden. De route zal ongetwijfeld het karakter van een zoektocht krijgen. Wat we wel doen, is een verkenning uitvoeren naar mogelijke toekomstbeelden, waarbij we het accent leggen bij het technische systeem.

Er zijn in theorie tal van varianten denkbaar om het doel te halen. Binnen die varianten zoeken we naar de robuuste onderdelen, waarvoor in de routekaart voor Nederland implementatietrajecten zouden kunnen worden geschetst. Daarnaast kunnen er onderdelen zijn, die mogelijk van groot belang kunnen zijn, maar waar nog onzekerheden omheen hangen. Deze vragen in de uitwerking van de routekaart om leertrajecten met concrete leerdoelen.

De volgende stap in de backcasting is een stappenplan in de tijd voor de implementatie- en leertrajecten. Voor enkele voorbeelden geven we een ruwe schets van zo'n stappenplan, de basis voor een routekaart. Er zijn vele voorbeelden van dergelijke routekaarten, in de meeste gevallen gericht op een specifieke technologie of van een specifieke sector. De meerwaarde van de routekaart naar een CO₂-arm Nederland zou kunnen zijn een grotere betrokkenheid van meer partijen, die samen voor de benodigde systeeminnovatie moeten zorgen. Het is uiteindelijk aan de stakeholders om samen met de overheid hieraan invulling te geven. Ook samenspel met omliggende landen zal zinvol zijn.

Met de uitwerking van zo'n stappenplan wordt duidelijk wat de eerste stappen moeten zijn en wie die stappen moeten zetten. Ongetwijfeld zijn er barrières voor die eerste stappen. We proberen voor belangrijke onderdelen van het toekomstige systeem deze barrières in beeld te brengen. Het is de uitdaging, ook voor beleid, om die barrières te slechten en zo voortgang te houden in het transitieproces. We gaan in dit rapport niet zover dat we aanbevelingen doen voor concrete beleidsinstrumenten. Wel laten we een aantal mogelijkheden de revue passeren.

1.4 Opbouw van het rapport

Op basis van de doelstelling van een emissievermindering van broeikasgassen in 2050 van 80 procent ten opzichte van 1990, worden allereerst toekomstbeelden voor Nederland in 2050 verkend, waarin dat doel kan worden gerealiseerd. Maar voordat we dat kunnen doen, moeten we eerst inzicht hebben in de mogelijke sociaal-economische ontwikkelingen in Nederland, de bronnen van emissies en de mogelijkheden voor vermindering van deze emissies. Daarbij ligt het accent bij technische maatregelen en mogelijke beperkingen.

In hoofdstuk 2 beginnen we met een overzicht van de huidige situatie. Omdat broeikasgasemissies voor het grootste deel gekoppeld zijn aan de inzet van olie, gas en kolen, geven we daarbij een schets van het huidige energiesysteem. Vervolgens construeren we een referentiebeeld voor Nederland en de Nederlandse economie in 2050. Er zijn vele beelden mogelijk. We hebben ervoor gekozen één referentiebeeld voor 2050 neer te zetten, gebaseerd op de referentieraming van PBL en ECN (ECN/PBL 2010). Dat referentiebeeld is vooral van belang om inzicht te krijgen in het energiegebruik van de bedrijven, het transport, en de huishoudens in 2050 zonder vergaande vermindering van broeikasgassen. We vervolgen in hoofdstuk 2 met de mogelijkheden om die energievraag te beperken. Daartoe lopen we de diverse sectoren langs: verkeer en transport, de gebouwde omgeving, de industrie en de landbouw. Het gaat daarbij vooral om technische maatregelen om processen, auto's, woningen en apparaten energie-efficiënter te maken. Daarnaast kunnen veranderingen in de consumptie op vele manieren doorwerken in een vermindering van het energiegebruik. In principe is hiermee heel veel mogelijk, maar de daarvoor benodigde gedragsverandering is bepaald niet vanzelfsprekend. We beschouwen kort enkele van deze opties.

De uitdaging is om te voldoen aan de energievraag met een vernieuwd energieaanbodstelsel zonder veel broeikasgasemissies. Daartoe zijn er vele schone technieken, onder meer die gebruikmaken van hernieuwbare energie. Die hernieuwbare energie is echter veel minder geconcentreerd beschikbaar en/of minder gemakkelijk winbaar dan de fossiele voorraden. Dat geeft beperkingen aan de potentiële inzet van hernieuwbare energie. In hoofdstuk 3 lopen we deze beperkingen langs. Het aanbod van duurzaam geproduceerde biomassa wordt daarin besproken, maar ook de ruimte voor wind- en zonne-energie en de beschikbaarheid van warmte uit de bodem op verschillende diepten worden behandeld. Daarnaast is er behoefte aan opslagcapaciteit, zowel tijdelijk voor energie die later nodig is als definitief voor CO₂. Ook de capaciteit in natuurlijke systemen voor opslag komt in hoofdstuk 3 aan de orde.

In hoofdstuk 4 geven we een overzicht van de technieken die zijn meegenomen in de verdere analyses. Sommige daarvan worden al toegepast, sommige verkeren nog in het stadium van eerste experimenten. Vele technieken kunnen qua prijs-prestatieverhouding nog verder verbeteren, maar hoeveel is onzeker. Om die reden zijn er geen technieken vanwege hun kosten buiten beschouwing gebleven en is ook geen strikte volgorde van kostenefficiëntie gehanteerd. Er wordt in dit rapport geen technische achtergrondinformatie gegeven in de vorm van principes van technologieën of beschrijvingen van installaties. De toelichting op de technieken in hoofdstuk 3 heeft vooral betrekking op de betekenis van die technieken voor het stelsel, de daarbij behorende broeikasgasemissies en mogelijke beperkingen bij de toepassing ervan. Zoals eerder al aangegeven worden andere effecten van de technieken niet in dit rapport beschouwd. Dat betekent bijvoorbeeld dat we niet ingaan op de risico's van kernenergie en CO₂-opslag. De meeste technieken zijn onderdeel van of direct gerelateerd aan het energiesysteem. We hebben echter ook te maken met niet verwaarloosbare procesemissies, bijvoorbeeld in de landbouw en bij bepaalde bedrijven. Het aandeel niet-CO₂-broeikasgassen (methaan, lachgas, fluorhoudende verbindingen) hierin is groot. In hoofdstuk 4 komen ook de technische mogelijkheden om deze emissies te verminderen aan de orde.

In de hoofdstukken 2, 3 en 4 worden de basiselementen besproken, waarmee een CO₂-arm Nederland kan worden ingericht. Daarmee zijn we in staat invulling te geven aan een belangrijk onderdeel van de backcasting: het toekomstbeeld. We hebben al eerder aangegeven dat er niet één optimaal toekomstbeeld wordt gepresenteerd. Daarvoor zijn de onzekerheden over een zo lange periode te groot. Er zijn vele varianten mogelijk om tot een emissievermindering met 80 procent te komen. We hebben vele van deze varianten geanalyseerd op zoek naar robuuste elementen daarin, mogelijk belangrijke onderdelen en niet-passende technieken. De resultaten staan in hoofdstuk 5. De routekaart kan worden gezien als de beschrijving van de energietransitie, de opbouw van een nieuw energiesysteem. Bij de analyses hebben we vooral gekeken naar de rol van vier mogelijk belangrijke bouwstenen voor dat nieuwe energiesysteem:

- vermindering van de energievraag
- biomassa

- afvang en opslag van CO₂
- CO₂-vrije elektriciteitsproductie (wind, zon, kernenergie, geothermie) in combinatie met vergroting van het aandeel elektriciteit in het energiegebruik.

Elk van deze bouwstenen omvat een scala aan technieken, waarmee op vele plaatsen in het systeem kan worden doorgedrongen. In hoofdstuk 5 wordt beschreven of het mogelijk is het doel te halen zonder één van deze bouwstenen en zo ja, onder welke condities. Vervolgens zoomen we verder in op het belang van specifieke technieken.

In hoofdstuk 6 komen we bij de volgende stap in de backcasting, de implementatie- en leertrajecten. Hiermee komen we in feite bij een aanzet voor de invulling van een routekaart. Het is niet de doelstelling van dit rapport om de routekaart in detail uit te stippelen. Zoals al eerder is aangegeven is die invulling aan stakeholders en overheid samen. We willen wel het proces om te komen tot een routekaart prikkelen met voorbeelden van stappen die ons inziens logischerwijs daarin passen. Daarmee komen we enigszins los van de technologie, omdat er nogal veel moet gebeuren voordat een technisch systeem de gewenste functie kan hebben. Dat kan met infrastructuur te maken hebben, maar ook met de organisatie eromheen. Voor een zestal deelsystemen werken we dit in hoofdstuk 6 een stappenplan uit. Van andere deelsystemen worden de belangrijkste aandachtspunten voor een stappenplan kort belicht.

Tot op dit punt in de analyse hebben we vooral gekeken naar de haalbaarheid van de doelstelling voor broeikasgasemissies. Zaken als betaalbaarheid, energiezekerheid en verdienpotentieel komen in hoofdstuk 7 aan de orde. In de eerste plaats beschouwen we de kosten van het systeem in 2050 ten opzichte van de situatie dat er met de huidige technologie zou zijn doorgedaan. De onzekerheden daarin zijn verkend door zowel met optimistische als pessimistische verwachtingen voor de prijs-prestatieverhouding voor technieken in 2050 te werken. Er liggen op de route naar 2050 echter ook extra kostendrempels, bijvoorbeeld in de vorm van technieken die nog niet helemaal uitontwikkeld zijn en daarom een relatief hoog prijskaartje hebben. Hier gaan we in het tweede deel van hoofdstuk 7 op in. De energietransitie biedt bedrijven ook een verdienpotentieel. We vatten de belangrijkste conclusies van enkele studies daarnaar samen.

In hoofdstuk 8 komen we bij de rol van het beleid. De routekaart zelf kan een belangrijke beleidsstap zijn in het vergroten van de consistentie in het langetermijnbeleid. Daarbij is consistent iets anders dan onveranderlijk. Helderheid over leertrajecten draagt daar bijvoorbeeld nadrukkelijk aan bij. De belangrijkste typen barrières worden op een rij gezet met de mogelijke rol van de overheid om ze te overwinnen. Daarnaast beschouwen we de betekenis van de doelen voor 2020. Als deze beleidsdoelen als tussendoelen zouden worden beschouwd op de route naar 2050, geven ze dan voldoende prikkels aan de benodigde tussenstappen tot 2020? In het antwoord schuilt de beleidsuitdaging.

De vraag naar energie en energiebesparing

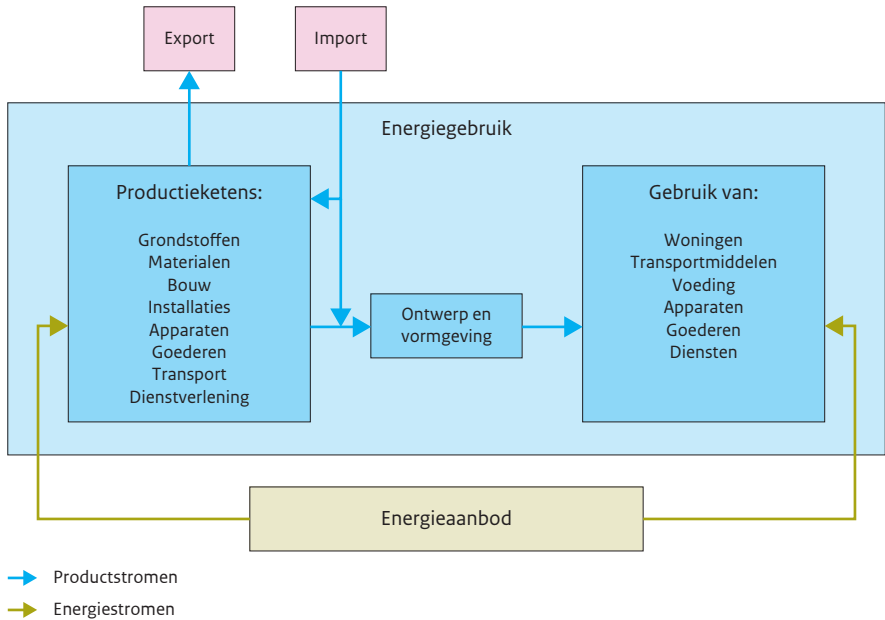
2.1 Inleiding

De emissie van broeikasgassen wordt voor zo'n 80 procent bepaald door het gebruik van fossiele brandstoffen voor energieopwekking. Energie is daarmee de sleutel van een schone economie. In de gedachte van de Trias Energetica beginnen we daarom met een analyse van de energievraag en de mogelijkheden tot vermindering van die vraag, omdat die doorwerkt in de broeikasgasemissies. Die vraag wordt enerzijds beïnvloed door de omvang van economische activiteiten, de productie en consumptie. Anderzijds zijn er vele technische opties om veel efficiënter met energie om te gaan.

In de scenario's voor de Europese klimaatroutekaart 2050 wordt ervan uitgegaan dat de maatregelen uit het energie-efficiencyactieplan worden gerealiseerd. De scenario's hanteren een totale primaire energieconsumptie in de EU van 69.000 petajoule (PJ) in 2030, ongeveer gelijk aan dat in 2010 en circa 55.000 PJ in 2050, ongeveer 20 procent minder dan nu (EC 2011b). Voor Nederland komen de besparingsmogelijkheden in dezelfde orde van grootte.

In dit hoofdstuk concentreren we ons op de vraag naar energie in 2050 in Nederland. We beginnen in paragraaf 2.2 met een korte algemene beschouwing van de productie-consumptieketens om de belangrijke variabelen die de energievraag verklaren in beeld te brengen en aangrijpingspunten voor vermindering te identificeren. Dan schetsen we in paragraaf 2.3 een mogelijk beeld van de productie en consumptie in 2050 als referentie voor verdere analyses, gebaseerd op veronderstellingen over de economische groei in de komende 40 jaar in een Europese en mondiale context. Autonome

Figuur 2.1
Aangrijpingspunten voor de vermindering van de energievraag



ontwikkelingen aangevuld met ontwikkelingen op basis van bestaand beleid kunnen in dat referentiebeeld al tientallen procenten aan efficiencyverbeteringen opleveren. Maar er is nog meer mogelijk, zowel met technische besparingsopties als met gedragsveranderingen. In paragraaf 2.4 geven we daarvan een overzicht voor alle sectoren. In de daaropvolgende paragrafen worden de besparingsopties per sector toegelicht.

2.2 Productie-consumptieketens

Energie is nodig voor het produceren van goederen en producten en bij het gebruik ervan. Daarbij zijn de drie belangrijke aangrijpingspunten voor het verminderen van de energievraag herkenbaar (figuur 2.1):

1. minder of ander gebruik van producten;
2. aanpassen van de producten zodat ze zuiniger zijn in het gebruik, of minder materialen vragen;
3. efficiëntere productieprocessen.

De energievraag komt deels voort uit het gebruik van woningen, transportmiddelen, voeding, apparaten, goederen en diensten (figuur 2.1, rechterblok). De energievraag die daardoor ontstaat is afhankelijk van de mate en wijze van gebruik, maar ook van het ontwerp. Dit bepaalt immers hoe zuinig bijvoorbeeld een apparaat of woning is bij gebruik (figuur 2.1, midden). Ook de productie van deze producten vergt energie in de verschillende sectoren (industrie, bouw, enzovoort; figuur 2.1 linkerblok). Om aan deze (finale) energievraag te voldoen – in de vorm van warmte, elektriciteit, en transportbrandstoffen, wordt deze energie geproduceerd uit primaire bronnen (kolen, ruwe olie, aardgas, biomassa, uranium, zon, wind, waterkracht, aardwarmte, enzovoort).

Nederland heeft een open economie en vele grondstoffen, materialen of (half) producten worden geïmporteerd of geëxporteerd. Daarom werkt een verandering in het gebruik van producten of in de vormgeving ervan niet altijd door in de productie in Nederland of andersom. Dat maakt die veranderingen niet minder zinvol, omdat deze effecten ergens optreden. Dit is bijvoorbeeld aan de orde als mensen in Nederland minder dierlijke producten zouden consumeren, die nu voor een groot deel worden geïmporteerd. We kunnen de emissievermindering dan niet of niet geheel op het conto van Nederland schrijven. Daartegenover staat het profijt dat Nederland kan hebben van de import van schone producten.

2.3 Consumptie en productie in 2050 volgens het referentiebeeld

In de aanpak volgens de methodiek van backcasting zoeken we naar varianten voor een schone economie in 2050. Daarvoor is de energievraag in 2050 van groot belang. Deze is gekoppeld aan de toekomstige niveaus van activiteiten, de industriële processen, mobiliteit en transport, de woonomgeving, landbouwproductie, enzovoort. Hoewel in een periode van 40 jaar nog vele veranderingen kunnen plaatsvinden, kan het toekomstbeeld evenmin helemaal los worden gezien van de huidige situatie. Daarom maken we gebruik van een scenariobenadering om te komen tot plausibele activiteitsniveaus en de daaraan gerelateerde energievraag in 2050. Voor de ontwikkeling van de nationale energievraag sluiten we aan bij de Referentieraming Energie en Emissies 2010-2020 (ECN/PBL 2010). Deze raming schetst de verwachte ontwikkelingen tot 2020 en geeft voor de grote lijnen een doorkijk naar de periode 2030-2040. Voor de analyse in dit rapport zijn deze ontwikkelingen op grond van de hieronder beschreven veronderstellingen doorgetrokken naar 2050.

De bevolking neemt in het referentiebeeld toe van 16,5 miljoen inwoners in 2010 tot ruim 17 miljoen in 2050 en sluit daarmee aan bij de meest recente CBS-prognose (CBS 2010). Het aantal woningen stijgt van ruim 7 miljoen nu naar ruim 8 miljoen in 2050. De afname van de gemiddelde grootte van huishoudens zet daarmee verder door.

Verondersteld is dat er in 2050 nog circa 6 miljoen woningen staan die zijn gebouwd voor 2010. De referentieraming gaat uit van een gemiddelde groei van het bnp van 1,7 procent per jaar tot 2020. Na 2020 is een wat lagere groei verondersteld, van 1,4 procent per jaar, mede als gevolg van een krimpende beroepsbevolking door vergrijzing. De arbeidsproductiviteitsstijging is de drijvende kracht achter de economische groei. Per sector is de groei gedifferentieerd, waarbij de verschuiving naar een diensteneconomie ook na 2020 verder doorzet. Binnen Europa is verondersteld dat Nederland een relatief energie-intensieve economie behoudt, vanwege de gunstige geografische ligging voor de productie van bulkproducten (zoals transportbrandstoffen, basischemicaliën en staal).

Door de veronderstelde groei van de bevolking en economie liggen de activiteiten-niveaus in 2050 hoger dan nu. Dit leidt ook tot meer transport. Er is uitgegaan van respectievelijk zo'n 30 procent meer verreden kilometers met personenauto's en 70 procent meer met vrachtauto's. Ook de vraag naar overig transport groeit. Het energiegebruik en de emissies van internationaal transport (lucht- en zeescheepvaart) zijn in de referentieraming (ECN/PBL 2010) slechts ten dele meegenomen – alleen het deel dat valt onder internationale klimaatafspraken is daarin meegenomen. Om te komen tot een CO₂-arme samenleving zullen ook de emissies van internationaal transport moeten verminderen. In dit rapport zijn daarom mondiale ramingen van het energiegebruik voor internationaal transport (IEA 2010) toegerekend naar Nederland naar rato van het bnp, en meegenomen in de emissiereductieopgave. Voor de landbouw is verondersteld dat de veestapel zich tot 2020 ontwikkelt zoals in de referentieraming, en na 2020 op dat niveau blijft.

Uitgaande van deze ontwikkelingen in de activiteitsniveaus en de huidige technologie zou de finale energievraag in 2050 circa 40 procent hoger liggen dan nu. De finale energievraag is hier gerekend als som van PJ transportbrandstoffen, elektriciteit en warmte, inclusief een naar Nederland toegerekende bijdrage van internationale zee- en luchtvaart op basis van bnp-aandeel, en exclusief niet-energetisch gebruik van energiedragers. In het referentiebeeld is echter rekening gehouden met het feit dat door autonome processen van efficiencyverbetering en het nu vastgestelde beleid veel apparaten en processen energiezuiniger zullen worden. In dat geval ligt de finale Nederlandse energievraag in 2050 bijna 15 procent hoger dan het huidige gebruik. Zo mag de gemiddelde uitstoot van nieuw verkochte personenauto's in 2015 gemiddeld niet meer bedragen dan 130 gram CO₂ per kilometer, en moet met overige maatregelen de uitstoot met nog eens met 10 gram per kilometer afnemen (EC 2009). Woningen die gebouwd worden na 2020 zullen als gevolg van de herziene EU-richtlijn energiebesparing gebouwen 'bijna-energie neutraal' moeten zijn. Dat betekent dat de energievraag dicht bij nul moet liggen dan wel 'zeer laag' moet zijn. Elektrische apparaten in de gebouwde omgeving worden energiezuiniger als gevolg van de Ecodesign-richtlijn. Het huishoudelijk elektriciteitsverbruik in de referentieraming daalt hierdoor naar verwachting licht. In de referentieraming loopt de CO₂-prijs op van 20 euro per ton CO₂ in de periode tot 2020 tot ruim 40 euro per ton CO₂ in 2040, wat ook is aangehouden voor 2050. Dat zal naar verwachting leiden tot een

energiebesparingstempo in de industrie van circa 1 procent per jaar. Per saldo stijgt het energieverbruik in de industrie in de referentie met zo'n 15 procent.

Het resulterende referentiebeeld omvat de activiteitsniveaus in 2050. Er zijn echter ook andere toekomstbeelden denkbaar, als resultaat van meer of minder economische groei en andere verhoudingen tussen sectoren. Voor de routekaart naar een CO₂-arm Nederland is vooral de vraag naar energie cruciaal. Of het met meer of minder economische groei zal zijn, is van secundair belang. Die groei kan echter wel van invloed zijn op de noodzaak van aanvullende energiebesparingsmaatregelen om tot een bepaald niveau voor de energievraag te komen. Daarom bespreken we in de volgende paragrafen per sector de mogelijkheden om te komen tot vermindering van het finale energiegebruik.

2.4 Overzicht van de mogelijke ontwikkelingen in de energievraag

In de paragrafen 2.5 tot en met 2.9 worden de besparingsopties in de verschillende sectoren gegeven. Er zijn vele technische mogelijkheden en ook een ander gebruik van producten en diensten kan tot relevante besparing leiden. Gezien de grote onzekerheden met betrekking tot de activiteiten in 2050 kan een kwantitatieve samenvatting van de cijfers uit de volgende paragrafen niet meer dan een indicatie geven van het niveau van de energievraag waarop Nederland in 2050 kan komen met het benutten van vele besparingsmogelijkheden. In figuur 2.2 is dit indicatieve overzicht gegeven.

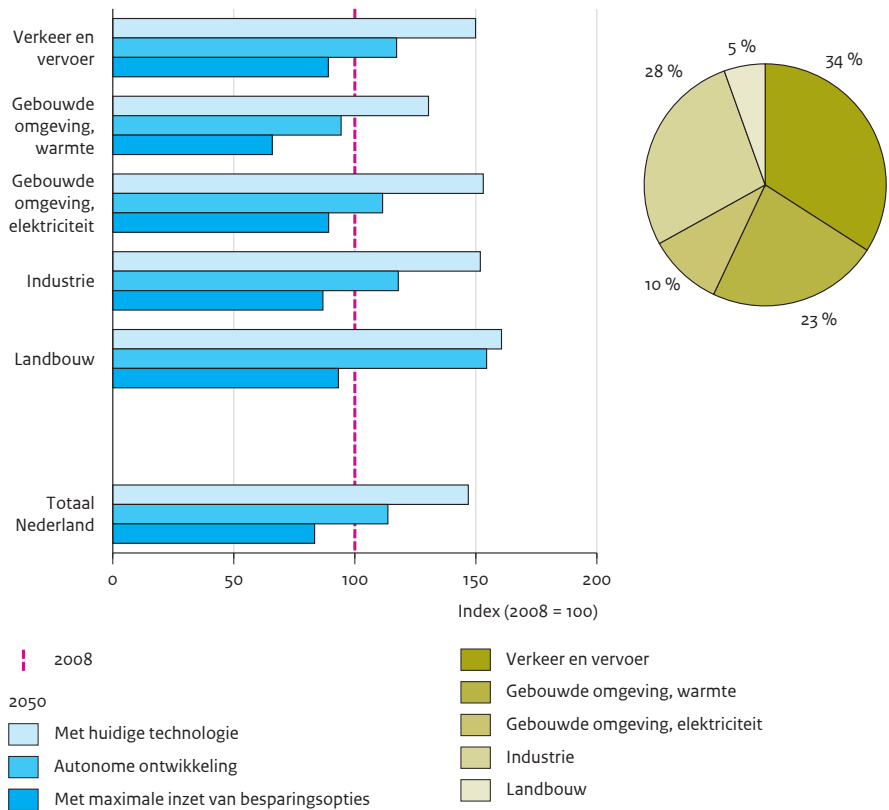
In deze figuur wordt het energiegebruik van 2008 als uitgangspunt genomen. Als gevolg van veronderstelde groei in de komende 40 jaar liggen de activiteitsniveaus in het referentiebeeld van 2050 aanzienlijk hoger. Als we zouden veronderstellen dat de technologie niet zou veranderen, dan zou het energiegebruik vooral bij bedrijven en verkeer met zo'n 50 procent toenemen. Door autonome efficiencyverbetering en bestaand beleid verandert de technologie echter ook, waardoor de toename in het referentiebeeld beperkt blijft tot bijna 15 procent. Door technische maatregelen in alle sectoren en door veranderingen in de consumptieve sfeer (in de gebouwde omgeving en verkeer) is er ten opzichte van het referentiebeeld nog een verdere besparing mogelijk van zo'n 30 procent.

Figuur 2.2 laat zien dat een toekomstbeeld met een energievraag die 30 procent lager ligt dan in het referentiebeeld, niet irreëel hoeft te zijn. We hebben dat inzicht gebruikt voor de varianten in de analyses op systeemniveau, die worden besproken in hoofdstuk 5.

Figuur 2.2
Energievraag per sector

Referentiebeeld, 2050

Bijdrage sectoren, 2008



2.5 Energiegebruik transport

Voor energiebesparing bij transport kunnen twee hoofdroutes worden onderscheiden:

- minder of ander gebruik van transportmiddelen;
- verbeteren van de energie-efficiëntie van transportmiddelen.

Ook bij de productie van transportmiddelen zijn er energiebesparingsmogelijkheden. Daar wordt echter op ingegaan bij een algemene beschouwing van de industrie. Gebruik van energievormen met een per energie-eenheid lagere CO₂-uitstoot (bijvoorbeeld

biobrandstoffen) hoeven niet tot een lager energiegebruik te leiden en worden daarom niet in dit hoofdstuk maar in hoofdstuk 3 besproken.

2.5.1 Gebruik van transportmiddelen

Bij het gebruik van transportmiddelen zijn er diverse mogelijkheden om de energievraag te verminderen:

- kiezen voor een transportmiddel met een lagere energievraag per kilometer, zoals de fiets of de trein (*modal shift*);
- zuiniger gebruik van een transportmiddel, zoals het nieuwe rijden waarbij langer in een hogere versnelling wordt gereden;
- verminderen van het gebruik van transportmiddelen, bijvoorbeeld door meer telewerken of televergaderen, of door het verhogen van de benuttingsgraad van transportmiddelen.

In de huidige praktijk blijkt het effect van bovengenoemde opties beperkt, en we veronderstellen het maximale effect hiervan op 15-20 procent vermindering van het energiegebruik in 2050 (zie ook KiM 2011). Met krachtiger beleid en vooral onder de voorwaarde van voldoende maatschappelijk draagvlak hiervoor zou een groter effect kunnen worden bereikt. Hieronder volgt een korte toelichting op de mogelijkheden voor modal shift, vooral als gevolg van het stimuleren en faciliteren van alternatieven.

In de afgelopen decennia blijkt het vliegverkeer en het autoverkeer te zijn toegenomen, en het treinverkeer en het langzaam verkeer min of meer te zijn gestabiliseerd, ondanks vele pogingen om de automobilist uit de auto en in de trein en op de fiets te krijgen. Modal shift-beleid bij personenvervoer richt zich vooral op (a) het uit de auto en in de trein, bus of op de fiets krijgen van de automobilist en (b) het uit het vliegtuig en in de hoge snelheidstrein krijgen van de luchtreiziger. Modal shift-beleid gericht op het verminderen van het autoverkeer tussen de steden is relatief minder kansrijk.

Een stad als Groningen heeft laten zien dat het stimuleren van fiets en openbaar vervoer (ov), mits consistent en jarenlang gevoerd, inderdaad kan leiden tot hoge aandelen fiets- en ov-gebruik. Als dit beleid overall ingezet zou worden, zou dit leiden tot een reductie van 4 tot 5 procent van de totale personenauto-emissies in Nederland (Nijland 2009). Vernieuwing van producten kan wellicht een extra stimulans tot gedragsverandering geven. De elektrische fiets – zeker als deze in geval van slecht weer zou kunnen worden overkapt – zou het perspectief voor de tweewieler voor grotere afstanden kunnen vergroten.

Voor verplaatsingen tot 800 kilometer zou de hogesnelheidstrein een functie kunnen vervullen als vervangende vervoerwijze voor het vliegtuig (KiM 2008a). Door MuConsult (2007) is geschat dat in 2020 maximaal 1,6 miljoen mensen op de lijnen Amsterdam-Brussel, -Parijs en -Londen met de HSL zullen reizen, die anders het vliegtuig zouden nemen. Dit is circa 2 tot 3 procent van het totaal aantal vluchten op Schiphol. Op de lijn Amsterdam-Frankfurt treedt geen substitutie op. Gelet op de huidige ervaringen met de

lage bezettingsgraad van de HSL-Zuid is het zeer de vraag of de werkelijk gerealiseerde substitutie ook maar enigszins in de buurt van deze cijfers zal komen.

Naar verwachting is ook bij vrachtvervoer het effect van modal shift beperkt. Het grootste deel van het vrachtvervoer gebeurt over de weg, en dit aandeel groeit nog steeds. Het vrachtvervoer bestaat uit verschillende marktsegmenten (weg, water, rail, lucht) die niet of nauwelijks overlappen. Een verschuiving hierin bewerkstelligen is erg lastig (zie bijvoorbeeld CE 2002; NEA 2003; PRC 2007; KiM 2008b).

2.5.2 Energie-efficiëntie van transportmiddelen

Er is een voortgaand proces van verbetering van de auto, waarbij onder invloed van normstelling en duurdere brandstoffen het zuiniger maken een belangrijk element is. Niet-motorgerelateerde verbeteringen, zoals lichtere materialen, lagere luchtweerstand door aerodynamische vormgeving, lagere rolweerstand door zuinigere banden, en zuinigere apparatuur en verlichting, kunnen personenauto's naar verwachting nog 10 tot 25 procent zuiniger maken (IEA 2008). Alle typen auto's, ongeacht motor- en aandrijfsysteem, kunnen hiervan profiteren.

Daarbovenop zijn er voortdurende verbeteringen in de efficiëntie van de verbrandingsmotor of voor nieuwe typen auto's van de elektromotor, de brandstofcel of de accu. De brandstofmotor kan tot zo'n 20 procent zuiniger worden (IEA 2008). In totaal kan een auto met verbrandingsmotor dus zo'n 30 tot 45 procent zuiniger worden. Een hybride auto, met zowel een verbrandingsmotor als een elektromotor, is weer efficiënter dan een auto met alleen een verbrandingsmotor. Hybrides zouden daardoor tot 50 procent energiezuiniger kunnen worden dan de huidige personenauto's. Ook vrachtauto's kunnen tot zo'n 40 procent zuiniger worden per gereden kilometer, door motortechnische en niet-motorgerelateerde verbeteringen (IEA 2008).

Een auto met elektromotor is bij gebruik energiezuiniger dan een auto met verbrandingsmotor. Dit komt doordat elektriciteit in een elektromotor min of meer direct voor aandrijving gebruikt kan worden en (bio)transportbrandstoffen eerst nog in de verbrandingsmotor omgezet moeten worden in aandrijfenergie. In de EU Renewable Directive (EC 2009b) wordt daarom ook een correctiefactor 2,5 aangehouden voor het gebruik van hernieuwbare elektriciteit in plaats van brandstoffen. Auto's met waterstof/brandstofcel zijn zo'n 15 tot 40 procent efficiënter dan een auto met verbrandingsmotor (ECN 2009b). We hebben het in deze gevallen echter over verschillende energiedragers, die ook op verschillende manieren worden geproduceerd met verschillende rendementen voor de omzettingprocessen. Een juiste beoordeling daarvan vraagt een analyse op systeemniveau (zie daarvoor hoofdstuk 5).

Voor de luchtvaart veronderstelt de IEA dat er in het basisscenario een energie-efficiëntieverbetering zal optreden van zo'n 30 procent tussen 2010-2050 (IEA 2010). Dit is het totale effect van beter ontwerp van vliegtuigen, verhogen van de bezettingsgraad van vliegtuigen en zuiniger vliegen (betere routing, minder vertraging bij landen en

landen in glijvlucht). In het verdergaande CO₂-reductiescenario (Blue Map) loopt dit op tot zo'n 45 procent. Voor de internationale scheepvaart veronderstelt de IEA dat er in het basisscenario een energie-efficiencyverbetering zal optreden van zo'n 25 procent tussen 2010 en 2050 (IEA 2010). Het technisch potentieel wordt geschat op een verbetering van 50 procent. Dit is het gezamenlijke effect van een breed scala aan mogelijke maatregelen, waaronder het verlagen van de weerstand door verbeterd ontwerp van schepen, varen met grotere schepen (schaalvoordeel), verbeterde motorefficiëntie en aandrijftechnologie, en zuiniger varen (IEA 2009a). In het Blue Map-scenario wordt ervan uitgegaan dat het technische potentieel voor efficiencyverbetering wordt gerealiseerd.

2.6 Warmtegebruik gebouwde omgeving

Het energiegebruik in de gebouwde omgeving (woningen en gebouwen met diverse functies) komt voort uit de vraag naar ruimteverwarming (en koeling), warm tapwater, koken en het gebruik van elektrische apparaten en verlichting. Deze vraag wordt in de huidige situatie vooral ingevuld met aardgas en elektriciteit. In deze paragraaf wordt ingegaan op de energievraag voor verwarmen en koelen. In paragraaf 2.7 wordt de elektriciteitsvraag behandeld.

2.6.1 Woningen

De energievraag voor ruimteverwarming is afhankelijk van het type woning, de mate van isolatie, de aanwezigheid van mensen en de gewenste temperatuur. Naast ruimteverwarming is er vraag naar warm tapwater (bijvoorbeeld voor douchen). In de huidige situatie is dit slechts 10 tot 20 procent van de totale warmtevraag in woningen, maar bij verdergaande isolatie wordt dit aandeel uiteraard groter. Gezien de huidige en voorgenomen regelgeving voor nieuwbouw kan ervan worden uitgegaan dat de energievraag voor ruimteverwarming in woningen die tussen nu en 2050 nieuw worden gebouwd, zeer laag zal zijn. De overheid streeft ernaar dat nieuwbouw vanaf 2020 energieneutraal is. Hoewel er nog geen officiële definitie voor energieneutraliteit is, wordt er doorgaans onder verstaan dat het gebouwgebonden en gebruiksgebonden energiegebruik van een dergelijk gebouw op jaarbasis gelijk is aan de hoeveelheid hernieuwbare energie die in (de directe omgeving van) het gebouw wordt opgewekt (AgentschapNI 2010). Aardwarmte, warmte uit zonnecollectoren en elektriciteit uit zonnepanelen op het gebouw zouden daarin dus meetellen, maar hernieuwbare elektriciteit en groen gas uit het openbare net niet.

Een groot deel van de voorraad in 2050 bestaat echter uit woningen en gebouwen die nu al gebouwd zijn. In het referentiebeeld is het aandeel van woningen die voor 2010 zijn gebouwd in het totale woningbestand ongeveer 75 procent. De uitdaging zit daarom vooral in de isolatie van bestaande woningen. Als deze op label B-kwaliteit worden gebracht, kan de warmtevraag gemiddeld ongeveer met 40 tot 50 procent worden verminderd. Met verandering van het gebruikersgedrag is daar bovenop nog een

besparing van ongeveer 10 procent te behalen, maar deze zal bij een grote groep gebruikers vanwege comfortverlies moeilijk gerealiseerd kunnen worden (CE 2010).

Er zijn nog grotere besparingen mogelijk als bij renovaties wordt gekozen voor het passiefhuisconcept. Passiefhuizen zijn woningen met een bijzonder laag energiegebruik voor ruimteverwarming en een zeer laag totaal energiegebruik. De woningen hebben een extreem goed isolerende en luchtdichte schil, en zijn in de regel uitgerust met een balansventilatiesysteem met warmteterugwinning dat voor een goede ventilatie van de vertrekken zorgt en de warmteverliezen door ventilatie minimaliseert. Een passiefhuis wordt voor het overgrote deel verwarmd door passieve zonbenutting en door de interne warmteontwikkeling van personen, verlichting, installaties en huishoudelijke apparaten. De resterende warmtevraag is zo laag geworden, dat kan worden volstaan met een beperkt verwarmingsvermogen dat geleverd kan worden via de ventilatielucht (ECN 2009c).

De productie van de bouw- en isolatiematerialen die worden gebruikt om woningen te renoveren kost uiteraard energie. Uit analyses van TNO blijkt echter dat de hoeveelheid energie die daarvoor nodig is aanmerkelijk kleiner is dan de hoeveelheid energie die in een periode van 40 jaar bespaard wordt door een gebouw ingrijpend te renoveren. Voor een rijtjeshuis dat gebouwd is in de jaren zeventig van de vorige eeuw kan – afhankelijk van de zwaarte van de renovatie – de totale CO₂-emissie in die 40 jaar een factor twee tot drie lager zijn dan wanneer er geen renovatie plaatsvindt. In de toekomst kunnen de productieprocessen van dergelijke bouwmaterialen bovendien nog minder energie-intensief worden, en mogelijk kunnen ook andere bouwmaterialen worden gebruikt. Daarbij komt vooral hout in beeld. Een grootschalige omschakeling naar hout betekent echter veel meer landgebruik met mogelijke verliezen aan biodiversiteit (zie ook paragraaf 3.3).

2.6.2 Utiliteitsbouw

De beschrijving die hiervoor voor woningen is gegeven geldt in grote lijnen ook voor de utiliteitsbouw (ziekenhuizen, winkels, horeca, enzovoort). Grootste verschillen zijn dat de vraag naar warm tapwater in de utiliteitsbouw kleiner is, maar de vraag naar koeling groter. Door de grote diversiteit aan gebouwfuncties binnen de utiliteitsbouw, is het lastig om het besparingspotentieel binnen deze sector in te schatten. Wel geldt dat de gemiddelde levensduur van gebouwen lager is dan van woningen, waardoor er meer kansen zijn om energiebesparing door middel van nieuwbouw te realiseren.

2.7 Energiegebruik elektrische apparaten

Huishoudens en diensten zijn verantwoordelijk voor zo'n 50 procent van het elektriciteitsgebruik in Nederland. Het overgrote deel van de resterende vraag komt van de industrie (ECN/PBL 2010). De vraag naar elektriciteit komt voort uit gebruik van velerlei apparaten. Voor de belangrijkste daarvan zijn op EU-niveau door middel van de

Ecodesign-richtlijn eisen gesteld aan het maximale verbruik of zijn energielabels verplicht. Hieronder vallen onder andere koelkasten, diepvriezers, lampen en televisies. In de referentieraming (ECN/PBL 2010) stabiliseert hierdoor het elektriciteitsgebruik van huishoudens en diensten tot 2020. Dit betekent een trendbreuk ten opzichte van het verleden, waarin sprake was van een steeds groeiende elektriciteitsvraag.

Na 2020 kan elektriciteit ook een belangrijke rol spelen voor toepassingen waar nu nog gas (verwarming, warm water, koken) of vloeibare fossiele brandstof (transport) wordt ingezet. De hiermee samenhangende toenemende elektriciteitsvraag wordt hier niet besproken, maar komt aan de orde in de volgende hoofdstukken.

Volledige vervanging van alle elektrische apparaten door nieuwe energiezuinige apparaten zou een energiebesparing opleveren van zo'n 35 procent bij huishoudens en zo'n 15 procent in de dienstensector, ten opzichte van de hier veronderstelde referentie voor 2020 (ECN 2006; VHK 2008; Ecofys 2009; Creatieve Energie 2010). Belangrijkste besparingsmogelijkheden zijn: zuiniger verlichting, zuiniger witgoed, verminderen van verlies bij stand-bygebruik, zuiniger en beter geregelde CV-pompen en ventilatoren, en efficiëntere computers en randapparatuur (VHK 2008).

In de periode tot 2050 is verondersteld dat verdere besparing wordt gerealiseerd met het vastgestelde beleid en door autonome vervanging van apparatuur. Het uiteindelijke elektriciteitsgebruik in 2050 zal natuurlijk ook afhangen van ontwikkelingen aan de vraagkant – hoeveel en welke apparaten gebruiken worden er dan gebruikt, waarvoor en hoe lang. Er zullen tegen die tijd vele nieuwe apparaten op de markt zijn. In de praktijk treden er vaak reboundeffecten op. Als apparaten energiezuiniger worden, worden ze langduriger gebruikt, of worden er andere toepassingen bedacht (zoals uitbundige kerstverlichting met leds).

2.8 Energiegebruik industrie

De zuinige apparaten, auto's en isolatiematerialen die zijn besproken, maar ook schone energieaanbodetechnieken, zoals zonnecellen en windturbines, moeten door de industrie worden geproduceerd. Daarbij levert de industrie een zeer belangrijke bijdrage aan de energietransitie. Maar de industrie is zelf ook een grootverbruiker van energie. De besparingsmogelijkheden voor de industrie nemen we hier nader onder de loep.

De industrie kenmerkt zich door een grote diversiteit aan processen, en het voert te ver om deze processen en de bijbehorende besparingsmaatregelen in detail te bespreken. Daarom worden de mogelijkheden om de energie-efficiëntie te verbeteren in meer generieke termen besproken. Tevens beperken we ons in deze paragraaf tot de efficiëntie van de processen, en gaan we niet in op warmtekrachtkoppeling (WKK), die in veel studies wel wordt beschouwd als energiebesparingsmaatregel. Deze optie vormt wel onderdeel van de integrale analyses in hoofdstuk 5.

Tabel 2.1

Energiegebruik van de industrie in Nederland in 2009 (MONIT 2011)

[PJ]	Finaal thermisch verbruik	Finaal elektrisch verbruik	Non-energetisch verbruik
Voedings- en genotmiddelen	48,0	22,1	0,3
Basismetalaal	27,5	22,4	46,6
Chemie	221,4	44,3	527,9
Papier	18,0	9,9	0,0
Overige metaal	15,6	13,6	19,1
Bouwmaterialen	22,5	5,2	0,0
Overige industrie	9,8	10,4	5,0
Totaal industrie	362,9	127,9	598,9

De industrie had in 2009 een finaal thermisch verbruik van 363 PJ en een finaal elektrisch verbruik van 128 PJ (zie tabel 2.1). Het non-energetische verbruik (599 PJ) heeft vooral betrekking op de productie van plastics en in mindere mate op de productie van stikstofkunstmest en staal. In hoofdstuk 4 wordt hier verder op ingegaan.

Bij het thermisch verbruik is de temperatuur van belang voor de wijze van opwekking. Bij relatief lage temperaturen kunnen bijvoorbeeld warmtepompen worden ingezet. In tegenstelling tot de gebouwde omgeving of de glastuinbouw is er in de industrie echter veel vraag naar hoge temperaturen. Hiervoor is de inzet van brandstoffen (bijvoorbeeld voor directe ondervuring of stoomproductie) of elektriciteit nodig. Warmte met temperaturen tot 100 °C maakte in 2006 ruim 10 procent uit van de totale warmtevraag in de industrie, warmte boven de 500 °C de helft en boven de 1.000 °C 20 procent (Agentschap NI 2010).

Het huidige tempo van energiebesparing in de Nederlandse industrie is ongeveer 0,9 procent per jaar (ECN 2009a). Als dat tempo de komende 40 jaar wordt gehandhaafd, dan ligt de vraag naar energie in 2050 30 procent lager dan wanneer er geen besparing zou plaatsvinden. Hoewel dit percentage aanzienlijk is, kan deze merendeels autonome efficiencyverbetering de groei van de productie in de diverse sectoren in het referentiebeeld naar verwachting niet compenseren.

Er is meer besparing mogelijk. Voorwaarde is dan wel dat er de komende decennia nieuwe energie-efficiënte technologieën worden ontwikkeld, en dat bij vervanging van de huidige installaties gekozen wordt voor de meest efficiënte technologieën die op dat moment beschikbaar zijn. Uitgaande van deze veronderstelling worden voor de periode tot 2050 in de literatuur verschillende inschattingen gemaakt voor het potentieel van energiebesparing:

- In het *Blue low 2050 emissions-scenario* van de IEA is in de periode tot 2050 een verbetering van de energie-efficiëntie met 40 procent verondersteld (IEA 2009a). Daarbovenop komt een besparing door recycling van grondstoffen en warmte van 9 procent. Deze cijfers gelden internationaal en zijn niet specifiek voor Nederland.
- Het Process Design Center vindt op basis van doorlichtingen van bedrijven in Nederland een gemiddelde afstand tot de huidige best practice van 37 procent. In sommige gevallen kunnen met nieuwe procesconcepten of procestechnologie besparingen tot wel 70 procent worden gehaald. (Vleeming et al. 2009). Er wordt in deze studie niet vermeld hoe representatief deze cijfers zijn voor de industrie als geheel.
- Afhankelijk van het tempo van technologieontwikkeling ramen Harmelink et al. (2010) voor de Nederlandse industrie een besparingstempo van 0,7 tot 1,5 procent per jaar in de periode 2005-2050, wat neerkomt op 25 tot 50 procent. Bij het hoge cijfer hoort de aanname dat zowel de huidige technologieën als de beste beschikbare technologieën jaarlijks met 0,5 procent in energieverbruik zullen afnemen.
- In het scenario van de European Climate Foundation zijn efficiëntieverbeteringen dicht bij 1,5 procent aangenomen, waardoor de energie-intensiteit in 2050 gemiddeld 50 procent lager is dan in 2010 (ECF 2010).

Met uitzondering van het Process Design Center veronderstellen de genoemde studies voor de industrie als geheel een maximale efficiëntieverbetering van rond de 50 procent in de periode tot 2050. In deze studies wordt globaal aangeduid welke maatregelen en technologieën daarvoor nodig zijn.

Op het thermisch verbruik kan in de chemische industrie en de raffinagesector bespaard worden door gebruik te maken van multifunctionele en/of kleinere reactoren, geavanceerde katalysatoren en scheidingstechnologieën met membranen of absorptie in plaats van destillatie (IEA 2009b; Harmelink et al. 2010). In de fijnchemie (zoals de farmaceutische industrie) kunnen biochemische processen met enzymen en bacteriën gebruikt worden om producten te maken. In de staalindustrie is waarschijnlijk maar een beperkte energie-efficiëntieverbetering van enkele procenten denkbaar, maar de inzet van nieuwe processen kan wel leiden tot verschuiving van de inzet van brandstoffen naar elektriciteit. Bij de overige metaalindustrie kan ongeveer 25 procent op het thermisch verbruik worden bespaard (VNMI/AVNeG 2011). In de voedingsketen kunnen processen als conserveren en drogen op de lange termijn respectievelijk 30 tot 40 procent en 75 procent efficiënter worden (Creative Energy 2008).

Ook op het elektriciteitsverbruik zijn forse besparingen mogelijk. In de industrie zijn elektrische motorsystemen (zoals pompen en ventilatoren) verantwoordelijk voor ongeveer twee derde van het elektriciteitsverbruik. Door bijvoorbeeld meer gebruik te maken van variabele aandrijving kan ongeveer 30 procent elektriciteit worden bespaard (Creatieve Energie 2010). Daarnaast zijn de primaire aluminium- en zinkproductie grootverbruikers van elektriciteit voor elektrolyse (circa 10 procent van het Nederlandse totaal). Diverse technische opties die momenteel worden onderzocht kunnen wellicht

op termijn de elektriciteitsvraag van deze processen met zo'n 20 procent verminderen (VNMI/AVNeG 2011).

2.9 Energiegebruik landbouw

Het energiegebruik in de landbouw wordt gedomineerd door de energie-intensieve glastuinbouw. Om energie te besparen in de glastuinbouw zijn in het programma 'Kas als energiebron' zeven maatregelen ontwikkeld ('het nieuwe telen'). Door anders om te gaan met het kasklimaat is het mogelijk energie te besparen zonder dat dit ten koste gaat van de productie. In de kassen wordt de luchtvochtigheid gereguleerd via droge buitenluchtaanzuiging (in plaats van droogstoken). Hierdoor ontstaat de mogelijkheid de kas beter te isoleren (meer en beter isolerende schermen toepassen, dubbelglas, isolatie gevel) en hoeft minder te worden geventileerd. Ook wordt 'met de natuur mee' geteeld, door plant- en oogstdata aan te passen en optimaal te profiteren van zonlicht en warmte. Deze eerste drie maatregelen uit het nieuwe telen kunnen tot 35 procent vermindering van de warmtevraag leiden (KaE 2009). De andere stappen uit het nieuwe telen leiden tot productieverhoging, of tot een andere manier van voldoen aan de vraag naar koeling ('s zomers) of verwarming ('s winters), via warmte-koudeopslag. Dit laatste wordt besproken in hoofdstuk 4. Ook toepassing van warmtekrachtkoppeling (WKK) in de glastuinbouw, die de laatste jaren een grote vlucht heeft genomen, wordt daar besproken.

De voedselproductie brengt ook niet-energiegerelateerde emissies van broeikasgassen met zich mee. Voor het verbouwen van voedsel en veevoer moeten meststoffen worden gebruikt, waardoor lachgasemissies ontstaan. Het houden van dieren voor de consumptie van vlees en melkproducten brengt methaanemissies met zich mee. De emissies kunnen verminderen door de productieprocessen schoner te maken, de consumptie te verminderen of de consumptie te verschuiven naar producten met een lagere broeikasgasemissie in de productieketen. Ook deze procesemissies uit de landbouw worden in hoofdstuk 4 besproken.

Mogelijkheden van en beperkingen in het energieaanbod

3.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk hebben we de energievraag voor 2050 besproken en de mogelijkheden om deze vraag te verminderen. Tegenover die vraag moet een aanbod worden geplaatst. Er zijn daarvoor diverse energiebronnen beschikbaar met sterk verschillende kenmerken. Die energiebronnen met hun mogelijkheden en beperkingen worden in dit hoofdstuk behandeld.

In de eerste plaats zijn er de uitputbare voorraden, zoals van kolen, olie en gas en ook uranium. Daarnaast zijn er de onuitputbare energiebronnen, die om die reden zo goed passen bij het gedachtegoed van duurzame ontwikkeling. Biomassa, zonne-energie en windenergie zijn daarvan de belangrijkste voorbeelden. Ze raken niet op, maar hun aanbod is wel begrensd door de beschikbaarheid van ruimte die nodig is voor het benutten van die bronnen. Bodemwarmte zit daartussenin, omdat die bij intensieve winning uitputbaar is, maar na verloop van tijd weer wordt aangevuld uit de schier onuitputtelijke aanvoer uit het diepste van de aarde.

Naast deze bronnen van energie zijn er andere kenmerken van de natuurlijke omgeving van belang voor het energiesysteem, en wel voor opslag van ofwel CO₂ of energie. Voor CO₂ liggen de interessante opslagmogelijkheden diep onder de grond of onder de zeebodem, waarbij het belangrijk is dat de CO₂ daar niet meer uit kan ontsnappen. Voor de opslag van energie wordt juist gekeken naar bergstreken met hoogteverschillen om de energie uit duurzaam opgewekte elektriciteit tijdelijk te kunnen opslaan in waterreservoirs.

De voorraden, ruimte en opslagcapaciteit zijn van groot belang voor het Nederlandse energiesysteem, maar daarbij gaat het niet alleen om de beschikbaarheid binnen Nederland. Er zijn diverse vormen van uitwisseling met het buitenland mogelijk en die worden ook belicht.

3.2 Fossiele brandstoffen en uranium

De beschikbaarheid van fossiele brandstoffen is met het huidige energiesysteem van groot belang voor de energiezekerheid. Het is echter niet zozeer de mondiale voorraad die daarbij zorgen baart, als wel de afhankelijkheid van een beperkt aantal landen. De huidige R/P-ratio (*Reserve-to-Production*) ligt voor olie, gas en kolen op respectievelijk 40, 60 en meer dan 100 jaren (BP 2009; IEA 2009). Hoewel het gebruik nog zou kunnen groeien, worden deze cijfers niet als een zorgpunt voor 2050 beschouwd om diverse redenen. In de eerste plaats kunnen er nieuwe voorraden worden gevonden. In de tweede plaats gaat het hierbij om conventionele voorraden en zijn er daarnaast aanzienlijke voorraden van bijvoorbeeld olie in teerzanden of schaliegas. In de derde plaats is er voor de meest kritische voorraad, olie, de technische optie om vloeibare olieproducten uit gas of kolen te produceren. Vanuit een klimaatperspectief is een aandachtspunt daarbij dat de emissies toenemen bij de winning en opwerking tot bruikbare producten.

De uraniumvoorraad is geschat op circa 5,5 miljoen ton (IEA 2007). Bij gelijkblijvend gebruik is dat voldoende voor circa 100 jaar. Met verbeterde technieken is daarbovenop nog 10 miljoen ton aan conventionele voorraden winbaar (ECN 2010a). Daarmee wordt ook de uraniumvoorraad veelal niet als beperkend voor de toepassing van kernenergie beschouwd.

3.3 Biomassa

3.3.1 Het mondiale potentieel aan biomassa in 2050

Het toekomstige aanbod van duurzame biomassa op de wereld is uiterst onzeker. Bovendien schuilen in het woord duurzaam wezenlijke beperkingen. Die hebben voornamelijk te maken met de gelimiteerde beschikbaarheid van land, de meest bepalende factor voor het potentieel. Een overzicht van de vele ramingen die in de literatuur zijn te vinden (zie tabel 3.1) toont een spreiding van minder dan enkele tientallen tot ruim 1.000 Exajoule (EJ oftewel 10^{18} Joule). Als we verregaande veronderstellingen buiten beschouwing laten, vinden we in de meeste literatuurbronnen een range van circa 150 tot 400 EJ per jaar. Het totale aanbod aan primaire energie (vooral kolen, olie, gas, uranium, biomassa) in de wereld ligt momenteel op ruim 500 EJ per jaar. Volgens de scenario's van de IEA (IEA 2010) kan dat in 2050 ongeveer 900 EJ zijn. Bio-energie kan daarin dus een groot aandeel leveren. Bij de vergelijking van deze cijfers moet wel worden bedacht dat vervanging van fossiele

Tabel 3.1

Schatting van het mondiale potentieel voor verschillende typen biomassa in 2050

Type biomassa	Potentieel in 2050 in EJ	Zekerheid over economische haalbaarheid	Toelichting
Organisch afval	5 - 75	Zeker	Vele stromen zijn ook inzetbaar als veevoer, hetgeen het aanbod beperkt.
Landbouw-residuen	15 - 100	Vrij zeker	Slechts een deel van de residuen komt beschikbaar, omdat er veel op het land blijft voor behoud van de bodemkwaliteit. Soms zijn er alternatieve toepassingen (bijvoorbeeld stro voor stallen).
Geteeld hout en houtresten uit bossen	0 - 150	Vrij zeker	Belangrijkste uitdaging is een goede inzamelstructuur en lokale eerste verwerking. Aandachtspunt is het achterlaten van voldoende houtresten voor behoud van de biodiversiteit.
Landbouwgewassen	0 - 780	Zeker	De productieketens zijn er al. De toekomstige omvang is afhankelijk van het beschikbaar komen van landbouwgrond en dus van ontwikkelingen in de voedselconsumptie (vooral dierlijke producten) en de landbouwproductiviteit.
Geteelde energiegewassen op gedegradeerd land	0 - 30	Zeer onzeker	Relatief lage opbrengsten, eerste oogst pas na enkele jaren en in gebieden met nauwelijks infrastructuur.
Aquatisch	0 - 90	Zeer onzeker	Potentieel zou zelfs hoger kunnen zijn. De onzekerheid betreft vooral het op termijn haalbare prijsniveau. Momenteel erg duur ten opzichte van andere biomassastromen.
Totaal	20 - 1.225		Range van alle genoemde waarden.
Totaal	150 - 400		Range van de meest genoemde waarden in de literatuur.

Bron: Domburg et al. (2010); IEA (2007); IPCC (2011); Sterner (2009); Vuuren et al. (2010); WBGU (2009)

grondstoffen door biomassa op zich tot een toename van de vraag naar primaire energie leidt, omdat de omzettingsrendementen lager zijn. Zo is voor de productie van 1 petajoule (PJ) groen gas via de vergassingsroute in sommige gevallen tot 2 PJ aan biomassa nodig.

Het totaal is opgebouwd uit ramingen voor diverse typen biomassa. Daarbij is een inschatting gegeven voor de (on)zekerheid over het daadwerkelijk beschikbaar komen

van de genoemde biomassa-stroom. Opties als het kweken van algen voor energie of het telen van energiegewassen als olifantsgras op armere gronden zijn vanuit ecologisch perspectief aantrekkelijk. Bedrijfseconomisch ziet het plaatje er vooralsnog zeer onaantrekkelijk uit en is het allerminst zeker of de daardoor opgeworpen barrières ooit zullen worden geslecht.

De grootste spreiding zit in de schattingen voor biomassa van landbouwgewassen. Die spreiding komt voort uit verschillende veronderstellingen over de mondiale landbouwproductiviteit en voedselconsumptie in de vele scenario's. Die kunnen leiden tot ofwel een tekort aan landbouwgrond, waarbij de productie van extra biomassa voor energie niet of nauwelijks mogelijk wordt geacht, ofwel tot het beschikbaar komen van steeds meer landbouwgrond, waardoor het toekomstige potentieel groot kan worden. Dit raakt ook aan de beschikbaarheid van land voor het telen van hout.

De meeste potentieelstudies komen uit op een range van 150 tot 400 EJ aan biomassa totaal, voor bio-energie en biograndstof voor de chemie. In de praktijk vormt het realiseren van dit potentieel nog een grote uitdaging, vooral om dat binnen duurzaamheidscriteria te doen zonder de omzetting van natuurlijke gebieden in landbouwgrond. Hoe groter de vraag, des te groter het risico op ongewenste omzetting van natuurlijke gebieden tot agrarisch land of plantages. Een mogelijk toekomstig aanbod van 150 EJ moet in dat licht worden gezien als een redelijk uitgangspunt voor de lange termijn. Een duurzaam aanbod van 400 EJ vraagt vele specifieke technische ontwikkelingen, alsmede een mondiale institutionele vormgeving die de duurzaamheid voldoende garandeert. Het is zeer de vraag of dat allemaal gaat lukken. Als in de toekomstplannen van vele landen wordt uitgegaan van een inzet van biomassa gebaseerd op die 400 EJ, dan zal daarom het risico op onduurzame praktijken en daarmee indirecte emissies (zie 3.3.4) groot zijn.

3.3.2 Beschikbaarheid voor Nederland

Het aanbod van duurzame biomassa in Nederland zelf is beperkt. Op basis van diverse gedetailleerde analyses van het mogelijke aanbod vanuit de agroproductieketen (WUR 2010; SenterNovem 2009) en uit het natuurbeheer (WUR 2007) wordt een totaal van maximaal rond de 200 PJ verwacht. De inventarisaties zijn vooral gericht op 2020, maar op basis van verwachtingen over de groei van de betreffende sectoren tot 2050 zal het aanbod dan niet veel hoger liggen. Specifieke energieteelt zal naar verwachting slechts in zeer beperkte mate hieraan bijdragen. Het moet vooral komen van rest- en afvalstromen of – iets anders geformuleerd – van specifieke productstromen uit de bioraffinage. Ook voor Nederland is er grote onzekerheid of de aquatische biomassa (bijvoorbeeld zeewier) op termijn een relevante extra bijdrage kan leveren.

Door productiviteitsstijgingen in de landbouw zou bij gelijkblijvende productie van melk, vlees en eieren (zie paragraaf 4.8) circa 150.000 hectare bouwland en mogelijk ook 150.000 hectare grasland minder nodig zijn dan nu voor een vergelijkbare productie. Hoewel het niet ondenkbaar is dat op een deel van het eventueel

Tabel 3.2

Beschikbaarheid van biomassa voor energie in Nederland in 2050 volgens verschillende verdeelsleutels van het mondiale aanbod

Verdeelsleutel	Mondiale aanbod	
	150 EJ	400 EJ
Gelijk aandeel per capita (0,19 procent)	285 PJ	760 PJ
Gelijk aandeel per eenheid bnp (0,49 procent)	735 PJ	1.960 PJ
Maximaal 50 procent voor mondiale handel en gelijk aandeel per eenheid bnp plus 50 procent van nationale voorraad	470 PJ	1.080 PJ

vrijkomende areaal teelt van energiegewassen kan plaatsvinden, is de inschatting dat dat areaal – voor zover het landbouwgrond blijft – vooral benut zal worden voor teelt van landbouwgewassen ten behoeve van voedsel- en veevoerproductie. Die gewassen leveren per hectare immers meer op.

In het geval van een grote rol van biomassa in het toekomstige Nederlandse energiesysteem, moet de aanvoer voor een belangrijk deel van import komen. Gezien het grote mondiale potentieel is er voor een relatief klein land als Nederland geen absolute grens aan deze import. De verwachting is echter dat bij verregaande mondiale klimaatafspraken biomassa een gewilde hernieuwbare grondstof zal zijn. Dan kan er in de praktijk wel degelijk sprake zijn van een beperkte beschikbaarheid tegen een beperkte prijs. Daarom is nagegaan welk aandeel er voor Nederland zou kunnen zijn bij verschillende verdeelsleutels (tabel 3.2).

Naast een gelijke verdeling per capita en per eenheid bnp is gekeken naar een verdeling, waarbij slechts de helft van de biomassa mondiaal wordt verhandeld. Daarvoor zijn enkele redenen aan te voeren. In de eerste plaats is niet alle biomassa gemakkelijk (lees goedkoop) te transporteren. Dat geldt vooral voor afvalstromen met een hoog vochtgehalte. Daarbij gebruiken landen met een relatief groot aandeel in de biomassaproductie ook zelf veel van die biomassa. Zie de voorbeelden van energieproductie uit hout in Zweden en rijden op ethanol in Brazilië. Ook in vele ontwikkelingslanden is de lokaal beschikbare biomassa dikwijls de enige energiebron. Zeker bij een strikter klimaatbeleid met emissiereductiedoelstellingen voor alle landen, is de eigen biomassa een belangrijke eerste optie.

Bio-energie is voor Nederland een aantrekkelijke optie, omdat de CO₂-emissies bij de verbranding van biomassa of daarvan afgeleide producten als biobrandstoffen, groen gas of bioplastics, niet hoeven worden meegeteld. Deze emissies worden immers gecompenseerd door de opname van CO₂ bij de groei van de biomassa. Aangezien Nederland veel biomassa importeert, vindt die opname ook grotendeels buiten onze grenzen plaats. In de huidige situatie hebben de exporterende landen in veel gevallen nog geen emissiedoelstellingen en bieden zij graag dat emissievoordeel aan ten gunste van hun handel. Die situatie kan veranderen als deze landen ook hun emissies moeten

terugbrengen. Weliswaar zullen zij hun handel niet op het spel willen zetten, maar de prijs voor CO₂ zal in de biomassaprijs gaan doorwerken.

3.3.3 Emissies bij de productie en verwerking van biomassa

Het uitgangspunt van een gesloten koolstofketen bij bio-energie is helaas iets te mooi om waar te zijn. De hoge productiviteiten die bij de teelt nodig zijn om efficiënt met land om te gaan, vragen ook energie voor landbouwwerktuigen en chemicaliën zoals kunstmest en bestrijdingsmiddelen, die op hun beurt ook weer moeten worden geproduceerd. De stikstof in de kunstmest kan niet voor 100 procent worden benut. Er treden altijd verliezen bij op in de vorm van het broeikasgas lachgas (N₂O). Die verliezen zijn het grootst bij biomassa uit agrarische producten, maar zeker niet verwaarloosbaar bij de houtteelt.

De inzet van rest- en afvalstromen is juist daarom zo interessant, omdat daarvoor geen extra teelt nodig is. Het beschikbare gewas wordt over de gehele keten beter benut. Bioaffinage is een ontwikkeling om die inzet verder te optimaliseren. Toch is ook bio-energie op basis van rest- en afvalstromen niet geheel emissievrij. Voor verzameling en transport van de biomassa, alsmede voor de verwerking tot gewenste producten als vloeibare biobrandstof voor verkeer en groen gas is energie nodig. Daarvoor kan bio-energie worden gebruikt, wat soms in de praktijk ook gebeurt, maar bij een beperkt aanbod van biomassa gaat dat weer ten koste van andere toepassingen voor die biomassa. In ieder geval gebeurt het voor een deel, zeker in het transport, met fossiele energie.

Hoewel dergelijke ketenemissies ook optreden bij winning en transport van kolen, olie en gas, net als bij de productie van zonnepanelen, windmolens en kerncentrales, zijn ze in veel gevallen bij bio-energie groter. Dit geldt vooral voor de inzet van agrarische producten als koolzaad voor biodiesel of graan voor bio-ethanol. Zelfs als aan de Europese duurzaamheidscriteria wordt voldaan, dan nog zal de totale vermindering aan broeikasgasemissies voor brandstoffen op basis van deze typen biomassa niet hoger zijn dan 60 procent. Voor de meeste andere typen biomassa (reststromen, hout, rietsuikerethanol) wordt de integrale vermindering geschat op meer dan 80 procent ten opzichte van het fossiele alternatief.

Bij een verschuiving van fossiele grondstoffen naar biomassa bij het eindgebruik in Nederland, is deze toename van de ketenemissies slechts in zeer beperkte mate terug te zien in de emissies binnen Nederland, aangezien het grootste deel van de ketenemissies in het buitenland plaatsvinden.

3.3.4 Emissies door veranderingen in landgebruik

Recente discussies rond de duurzaamheid van biobrandstoffen gingen vooral over het landgebruik. Immers, als er natuur wordt omgezet in landbouwgrond, dan verandert ook de samenstelling van de bodem en verdwijnt er vegetatie. Als de uitgangssituatie een arme of sterk gedegradeerde grond betreft, dan kan op deze manier de

bodemkwaliteit geleidelijk verbeteren en ook het koolstofgehalte van de bodem toenemen. In de praktijk komt de omgekeerde situatie meer voor: waardevolle natuurgebieden worden omgezet in landbouwgrond, waarbij veel koolstof als CO₂ in de lucht verdwijnt. Dat kan zelfs een grotere emissie opleveren dan de potentiële besparing van vele decennia gebruik van de op dat areaal geteelde bio-energie.

De directe omzetting van land voor de productie van biomassa voor energie is nog wel in productlabels of duurzaamheidscriteria (zoals in de EU) mee te nemen. Veel lastiger is dat voor indirecte omzetting van land (een voorstel van de Europese Commissie over hoe hiermee om te gaan in duurzaamheidscriteria is vertraagd en was bij de afronding van dit rapport nog niet beschikbaar). Het gaat om situaties waarin energiegewassen worden geteeld op bestaand agrarisch land en de productie van voedselgewassen daardoor verschuift, waarvoor ergens anders land wordt omgezet. Dat leidt tot indirecte emissies. Een raming van de emissie-effecten van de in 2008 in Nederland gebruikte biobrandstoffen in het verkeer, laat zien dat het onzeker is of daardoor al dan niet sprake is geweest van een netto toename (PBL 2010). Bovendien leidt de omzetting van natuurlijke gebieden tot landbouwgrond of voor plantages tot verlies aan biodiversiteit.

3.4 Opslagcapaciteit voor CO₂

Er zijn verschillende opties voor ondergrondse opslag van CO₂. In de eerste plaats kunnen lege aardgas- of olievelden worden benut. In Nederland komt in de nabije toekomst zowel op land als op zee aanzienlijke opslagcapaciteit in uitgeputte aardgasvelden beschikbaar. In totaal zal hierin naar schatting 2,2 gigaton (Gton) CO₂ kunnen worden opgeslagen (tabel 3.3). Dit is exclusief het Slochterenveld (met een verwachte capaciteit van ruim 7 Gton) dat ook om redenen van energiezekerheid waarschijnlijk tot het eind van de eeuw niet wordt uitgeput (EBN/Gasunie 2010). Bij een verdeling van deze opslagcapaciteit over een periode van 50 jaar kan jaarlijks gemiddeld 44 megaton (Mton) worden opgeslagen. Wanneer – bijvoorbeeld vanwege publieke weerstand tegen opslag op land – alleen de capaciteit op zee kan worden benut, kan gedurende deze periode jaarlijks 24 Mton worden opgeslagen.

Mogelijk kan er ook opslag plaatsvinden in Nederlandse aquifers, watervoerende lagen in de bodem. De omvang van de opslagcapaciteit is echter zeer onzeker, omdat er in vergelijking tot gasvelden weinig informatie bestaat over deze reservoirs en de afsluitende lagen daarboven. Geschat wordt dat de totale capaciteit van de aquifers in Nederland met een capaciteit groter dan 5 Mton tussen 0,07 en 0,15 Gton ligt (EBN/Gasunie 2010). In deze schatting zijn aquifers die onder bekende gas- en olievelden liggen niet meegenomen. Deze aquifers kunnen een aanzienlijk aanvullend opslagvolume hebben omdat de reservoirdruk door gas- of olieproductie mogelijk is verlaagd. Hoe dan ook is het kostenefficiënter om in Nederland eerst CO₂-opslag in (beter gedefinieerde) uitgeputte gas- en olievelden uit te voeren.

Tabel 3.3

Opslagcapaciteit voor CO₂ in Nederland en Europa

	Opslagcapaciteit in Nederland (Gton)		Opslagcapaciteit in Europa (Gton)	
	Land	Zee	Land	Zee
Lege gas- en olievelden	1,0	1,2	5,6	19,2
Aquifers	0,07 – 0,15	-	87	204 ¹
Steenkoollagen	0,04	-	Niet bekend	-

Bron: EBN/Gasunie (2010); Europipe (2010)

¹ Waarvan 182 Gton in Noorwegen (Noordzee).

Ten slotte kan CO₂ ook worden opgeslagen in Nederlandse steenkoollagen. Daarbij komt de CO₂ in de plaats van methaan dat aan de steenkool is geadsorbeerd; het methaangas kan worden gewonnen. De technische haalbaarheid hiervan in Nederland moet nog worden aangetoond, maar geschat wordt dat de praktische opslagcapaciteit slechts in de orde van grootte van 0,04 Gton zal liggen.

De CO₂ die in Nederland vrijkomt bij grote puntbronnen zou ook elders in Noord-Europa kunnen worden opgeslagen. Uit een recente studie (Europipe 2010) blijkt dat de Europese opslagcapaciteit aanzienlijk is, vooral in aquifers (tabel 3.3). In genoemde studie wordt een referentiescenario gehanteerd waarbij in 2050 cumulatief 18 Gton CO₂ uit Noord- en Midden-Europese bronnen zal zijn opgeslagen, terwijl dan nog maar een klein deel van de totale opslagcapaciteit is benut (25 procent van de gasvelden, 2 procent van de olievelden en 5 procent van de aquifers). Er is echter nog veel onzekerheid, met name over de capaciteit in de aquifers. Voor bijvoorbeeld de grote Utsira-aquifer bij Noorwegen varieert de schatting van de capaciteit in verschillende bronnen tussen 40 en 600 Gton (Lindeberg 2009; Fenco 2010). Hoewel al jarenlang een relatief kleine hoeveelheid CO₂ (circa 1 Mton per jaar) in deze aquifer wordt opgeslagen, is nog onbekend wat de mogelijke beperkingen zijn als de druk er steeds hoger wordt.

Zo'n 70 procent van de Europese opslagcapaciteit is gesitueerd in de Noordzee. Op Europese schaal ligt er dus voor de benutting ervan door vele landen een grote uitdaging wat betreft de infrastructuur. Voor Nederland ligt een groot deel van deze capaciteit juist op relatief beperkte afstand. Zelfs een pijpleiding vanuit Nederland naar bijvoorbeeld de Noorse Utsira-aquifer – met een lengte van circa 800 kilometer – zou onder bepaalde voorwaarden economisch haalbaar kunnen zijn (Van den Broek et al. 2010).

3.5 Bodemwarmte

Er is een grote voorraad warmte aanwezig in de bodem onder Nederland. De temperatuur neemt toe met de diepte. We onderscheiden drie vormen van benutting op

verschillende diepten: warmte-koudeopslag, geothermie voor warmteproductie en geothermie voor elektriciteitsproductie.

3.5.1 Warmtepompen en warmte- en koudeopslag (WKO)

Op beperkte diepte heerst er in de bodem een tamelijk constante temperatuur van 15-25 °C. Deze warmte kan met behulp van warmtepompen worden benut voor de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving, de glastuinbouw en sommige industriële sectoren. Het afgekoelde water – dat op circa 100 meter afstand van de warme bron in de bodem wordt opgeslagen – kan in de zomer worden toegepast voor passieve koeling van utiliteitsgebouwen en (semi)gesloten kassen. De warme bron kan ook worden gebruikt voor opslag van overtollige warmte, die in de zomer afkomstig is van bijvoorbeeld zonnecollectoren.

De bodemwarmte en -koude kan worden benut door grondwater rechtstreeks rond te pompen (open systeem), of door toepassing van warmtewisselaars waarin een vloeistof (meestal water met antivriesmiddel) wordt rondgepompt die de warmte of koude uit de watervoerende laag opneemt (gesloten systeem). Het potentieel in de bodem is groot, maar er zijn beperkingen aan de hoeveelheid warmte en koude per oppervlakte-eenheid. Met name bij open bodemenergiesystemen voor grote kantoren, wooncomplexen vanaf dertig tot vijftig huizen, glastuinbouw en industrieterreinen strekt het invloedsgebied zich doorgaans enkele tientallen meters rondom de bron uit (IenM 2011a). Op plaatsen waar veel hoge kantoren of tuinbouwkassen dicht op elkaar zijn gebouwd, kan het daarom voorkomen dat het ondergrondse aanbod van de ondiepere watervoerende lagen ter plaatse ook bij een gecoördineerde aanpak onvoldoende is om aan alle bovengrondse vraag te voldoen. Dit kan in principe worden opgelost door de warmte/koude van diepere watervoerende lagen en/of van verder weg te gebruiken, maar daardoor kunnen projecten wellicht onrendabel worden.

3.5.2 Geothermie voor warmtevoorziening

Op veel plaatsen in Nederland heeft het water dat zich op dieptes vanaf 1,5 à 2 kilometer bevindt, een temperatuur die hoog genoeg is om woningen en kassen rechtstreeks te verwarmen (dat wil zeggen zonder warmtepompen). De theoretische voorraad wordt geschat op 90.000 PJ, maar het technisch-economische potentieel zal in de praktijk (veel) lager zijn. Niet overal in Nederland is de ondergrond geschikt (vanwege een te lage temperatuur of een te geringe doorlaatbaarheid van de watervoerende gesteenten) om het vermogen te leveren dat nodig is om een warmteproject rendabel te laten zijn. Uit inventariserend onderzoek van TNO blijkt dat er vooral in Zuid-Holland, Noord-Holland, Groningen, Friesland en Drenthe gebieden zijn waar de kans op een succesvolle boring groot is (KWR 2010). Niet overal is de bodem echter al gedetailleerd onderzocht, dus mogelijk blijken in de toekomst ook andere gebieden kansrijk te zijn.

Ook bovengronds zijn er beperkingen. Geothermie is pas betaalbaar als er voldoende warmtevraag is in redelijke nabijheid van de bron. Kassen en woonwijken kunnen flinke afnemers zijn, maar bij woonwijken is een warmtenet nodig om alle huizen van warmte

te kunnen voorzien. In beginsel lijken geothermieprojecten het meest kansrijk in nieuwe wijken, omdat de aanleg van zo'n warmtenet in dat geval minder ingrijpend en kostbaar is dan in bestaande wijken. Nieuwbouw kan echter ook zeer energiezuinig worden ingericht en daarmee kan de warmtevraag zo laag worden dat een andere vorm van warmtevoorziening goedkoper is. In bestaande wijken is verregaande energiebesparing niet altijd gemakkelijk realiseerbaar en zou warmtevoorziening via een warmtenet toch de meest rendabele oplossing kunnen zijn. De aanleg van het warmtenet en de vervanging van de bestaande gasinfrastructuur en verwarmingsapparatuur is in de praktijk echter een lastige opgave.

In de praktijk wordt het potentieel dus bepaald door de ruimtelijke verdeling van zowel het warmteleverend vermogen van de ondergrond als van de bovengrondse vraag. Voorlopig wordt er in ramingen uitgegaan van een potentieel van enkele tientallen PJ per jaar, maar onderzoek om dit beter in beeld te krijgen is gaande (PBL 2011a).

3.5.3 Geothermie voor elektriciteitsproductie

Nog dieper in de bodem (meer dan 4 kilometer) heersen temperaturen die voor stoom kunnen zorgen en daarmee elektriciteitsproductie mogelijk maken. In het buitenland bestaan dergelijke centrales al, meestal op gunstige – want minder diepe – locaties, met de Verenigde Staten als koploper en in Europa vooral Italië en IJsland. In Nederland wordt de haalbaarheid ervan verkend. Technisch is een dergelijke centrale zeker mogelijk, maar de betaalbaarheid op de lange termijn is zeer onzeker omdat er nog een aanzienlijke leercurve moet worden doorlopen (IF 2011). Daardoor valt er ook nog weinig te zeggen over het rendabele potentieel.

3.6 Ruimte voor windenergie

Het technische potentieel van windmolens in Nederland is zeer groot. De beschikbare ruimte op land en op zee moet echter gedeeld worden met tal van andere functies. Maar dan nog kunnen windmolens op land en zee in 2050 een belangrijke bijdrage leveren aan de elektriciteitsproductie, tot zo'n 150 terawattuur (TWh). Dit is meer dan het huidige elektriciteitsgebruik in Nederland. Het grootste gedeelte van dit potentieel ligt bij wind op zee (zie tabel 3.4).

3.6.1 Wind op land

Het opgestelde vermogen aan windmolens op land bedraagt momenteel circa 2 gigawatt (GW), waarmee ongeveer 3 procent van de Nederlandse elektriciteit wordt geproduceerd. Verdere doorgroei van wind op land wordt vooral beperkt door de mate van publieksacceptatie, inpasbaarheid in het landschap en het samenspel met ander ruimtegebruik.

Een doorgroei tot zo'n 4 GW kan worden gerealiseerd door het vervangen en optimaliseren van de bestaande windparken. Nieuw geplaatste windmolens zijn in de

loop der jaren steeds hoger geworden en hebben meer vermogen. Molens die tot 2005 zijn geplaatst hebben een vermogen van tot 1 megawatt (MW), molens die nu worden gebouwd zijn vaak 2 tot 3 MW, terwijl ook al met 5 MW wordt gewerkt. Grotere molens hebben echter een grotere onderlinge afstand nodig, waardoor het vermogen per vierkante kilometer uiteindelijk stabiliseert.

Verdere doorgroei zal dan op nieuwe locaties moeten gebeuren. Het Rijk is in overleg met de andere bestuurslagen om een tiental grootschalige parken aan te wijzen. Deze gebieden zijn voorgesteld in het concept Ruimtelijk Perspectief Wind op Land (VROM 2010). Deze parken krijgen elk meer dan 100 MW aan opgesteld vermogen, sommige een veelvoud daarvan. Als wordt verondersteld dat er weinig maatschappelijk draagvlak is voor nieuwe locaties boven op de gebieden die zijn voorgesteld in het concept Ruimtelijk Perspectief Wind op Land, dan zou het potentieel 4 GW zijn. Als echter op een deel van de vele duizenden bedrijventerreinen en grote landbouwbedrijven een windmolen geplaatst zou worden – hetgeen bedrijfseconomisch aantrekkelijk zou zijn in de periode na 2020-2030 – dan zou het potentieel van wind op land hoger kunnen uitvallen dan hierboven verondersteld.

In de periode tussen 2020-2030 zou wind op land kostencompetitief kunnen worden met de elektriciteitsprijs op de groothandelsmarkt (EEA 2009; ECN 2010b). Het potentieel voor wind op land is in deze studie beperkt tot maximaal 20 TWh opgewekte elektriciteit. Dit komt overeen met circa 8 GW opgesteld vermogen in 2050, een verviervoudiging van het opgestelde vermogen in 2009. Het kabinet en provincies streven naar 6 GW opgesteld vermogen in 2020 (IenM 2011b).

3.6.2 Wind op zee

Het potentieel voor wind op zee is in deze studie gemaximeerd op 130 TWh opgewekte elektriciteit (circa 34 GW opgesteld vermogen), en sluit daarmee qua ordegrrootte aan bij de huidige elektriciteitsvraag (ECN 2011). Net als wind op land, concurreert wind op zee ook met ander ruimtegebruik. Daarbij gaat het om scheepvaart, visserij, natuurgebieden, platforms voor olie- en gaswinning, militair oefenterrein, kabel- en pijpleidingen, zandwinning, algemene uitsluitingen (12-mijlszone = 22 kilometer), en in de toekomst mogelijk opslag van CO₂. Tussen windparken moet ook afstand worden bewaard, omdat anders de windkracht te sterk afneemt (windschaduw).

Deels kunnen de ruimtelijke functies op zee worden gecombineerd worden (ECN 2011a). Zo kunnen sommige vormen van visserij goed plaatsvinden in gebieden tussen windparken. Internationale scheepvaartroutes of vrijwaringsgebieden rond infrastructuur zijn echter niet of minder eenvoudig te verplaatsen. De zoekruimte voor wind op het Nederlands Continentaal Plat is vastgelegd in de structuurvisie Nationaal Waterplan 2009-2015 (Rijksoverheid 2009). Ook andere landen hebben dergelijke ruimtelijke plannen. Internationale afstemming van deze nationale plannen kan bijdragen aan een optimaler gebruik van de Noordzee (ECN 2011a). De Europese Commissie moedigt in de Maritieme Strategie een dergelijke afstemming aan (EC 2009c).

Tabel 3.4

Verondersteld potentieel voor wind op land en wind op zee

	Potentieel opgesteld vermogen (GW)	Potentieel opgewekte elektriciteit (TWh)
Wind op land	8	20
Wind op zee	34	130

De kosten voor wind op zee lopen op naarmate de zeebodem dieper en de afstand tot de kust groter is (ECN 2011a). Veel ondiepe locaties dicht op de kust worden al gebruikt voor andere functies. Om kosten voor wind op zee te beperken zou het huidige ruimtegebruik heroverwogen kunnen worden, zoals algemene uitsluitingen binnen de 12-mijlszone en militair oefenterrein.

3.7 Zonne-energie

Zonne-energie kan met een zonnecel worden omgezet in elektriciteit en met een zonnecollector in warm (tap)water. Zonnecellen en -collectoren kunnen prima worden geïntegreerd in daken van woningen, kantoren en scholen. Zonnecellen zouden zelfs op of in gevels en in, op of langs infrastructuur kunnen worden ingezet. Op termijn zou er met speciale lichtdoorlatende zonnecellen op kassen in de glastuinbouw elektriciteit kunnen worden opgewekt. Dat biedt het grote voordeel dat het aanbod dicht bij de vraag kan worden gebracht en dat ook burgers en bedrijven de mogelijkheid krijgen om zelf op relatief kleine schaal hernieuwbare energie op te wekken. Er kunnen ook zonnecentrales worden gebouwd met velden vol panelen of langs infrastructuur, maar daarbij gaat het genoemde voordeel van nabijheid verloren en komt de technologie in concurrentie met andere centrales. Omdat de zonne-intensiteit in Zuid-Europese landen bijna twee zo hoog kan zijn als in Nederland, en de daar opgewekte elektriciteit via een Europees netwerk gedistribueerd zou kunnen worden, lijkt grootschalige inzet van deze optie in Nederland niet aantrekkelijk.

Dat neemt niet weg dat het potentieel op geschikte daken van woningen en utiliteitsbouw in Nederland aanzienlijk is (zie tabel 3.5); voor zonnestroom meer dan de helft van de huidige elektriciteitsvraag. Daarvan wordt nog maar een fractie benut: in 2010 is 0,06 TWh aan zonnestroom geproduceerd en ongeveer 1 PJ (0,3 TWh) warmte door zonnecollectoren voor met name tapwater (CBS 2011). Het beschikbare dakoppervlak is daarvoor geschat met behulp van het VESTA-model (PBL 2011a). Het potentieel beschikbare oppervlak bij de glastuinbouw van circa 120 vierkante kilometer is daarin nog niet meegenomen.

Het potentieel voor warmte is lager dan voor elektriciteit. Dat heeft te maken met de transportmogelijkheden van de energie, die voor warmte gering zijn. De energie moet in

Tabel 3.5

Potentieel aan zonnestroom en zonnewarmte in 2050 in Nederland

Type zonne-energie		Maximaal oppervlak volgens VESTA-model	Potentieel opgesteld vermogen	Potentiele productie
		[km ²]	GWp	Elektriciteit of warmte TWh/jaar
Zonnestroom*	Daken op woningen en utiliteit	325	88	73
	Gevels woningen	18	5	3
Zonnewarmte	Daken op woningen en utiliteit	20	-	8

* Aannamen: 10 vierkante meter zonnecellen per dak per woning, 3 vierkante meter zonnecellen op een woninggevel, 80 procent van het dakoppervlak bij de utiliteit is geschikt voor zonnecellen. Celopbrengst op dak 225 kWh per vierkante meter per jaar, op gevels 180 kWh per vierkante meter per jaar.

** Aannamen: 60 procent van de warmtapwatervraag in woningen en utiliteit wordt opgewekt met een zonnecollector, elke m² collector levert 1,5 GJ warmte, dan is voor de woningen 18 vierkante kilometer zonnecollector nodig (3 vierkante meter per woning) en voor de utiliteit bijna 2 vierkante kilometer.

de eigen woning worden benut en daarvoor volstaat een deel van het beschikbare dakoppervlak. Dat neemt niet weg dat er soms een afweging nodig is tussen benutting van de ruimte op een dak voor zonnestroom of voor zonnewarmte.

Een nadeel van beide vormen van zonne-energie is op dit moment dat een overmaat in de lente en de zomer niet goed kan worden opgeslagen voor de herfst en de winter, wanneer de vraag naar zowel warmte als elektriciteit het grootst is. Met mogelijkheden voor de opslag van warmte voor langere duur en de mogelijkheid van benutting op de gewenste temperatuur, zou het potentieel van vooral zonnewarmte groter kunnen worden.

3.8 Kernenergie

In paragraaf 3.2 is geconstateerd dat de uraniumvoorraad vooralsnog geen beperking oplevert voor de toepassing van kernenergie. Er zal echter een grens zijn aan het aantal kerncentrales dat tussen nu en 2050 in Nederland kan worden gebouwd. Waar deze grens ligt is echter moeilijk aan te geven. Een beperkende factor is dat de periode tussen het eerste plan voor een nieuwe kerncentrale en de realisatie ervan al gauw meer dan een decennium beslaat. Een andere mogelijke belemmering – althans voor de korte termijn – is dat er slechts een beperkt aantal bedrijven is met de kennis om

kernreactoren te bouwen. Op de langere termijn hoeft dit echter geen knelpunt te zijn, omdat een grote mondiale vraag naar nieuwe kerncentrales relatief snel zal kunnen leiden tot een verruiming van de bouwcapaciteit. Het feit dat er in Nederland vooralsnog slechts drie locaties voor nieuwe kerncentrales beschikbaar zijn (Eemshaven, Maasvlakte en Borssele) hoeft geen beperking te betekenen voor het vermogen, aangezien kerncentrales relatief weinig ruimte vergen.

Op arbitraire gronden hebben we verondersteld dat er tot 2050 maximaal vier nieuwe kerncentrales van elk 2,5 GW kunnen worden gebouwd, waarmee 80 TWh elektriciteit kan worden geproduceerd.

3.9 Waterreservoirs voor opslag van energie

Natuurlijke systemen bieden ook mogelijkheden voor de opslag van energie, in het bijzonder bij waterreservoirs met hoogteverschillen. Bij een toename van het elektriciteitsaanbod van fluctuerende bronnen als windenergie en zon-PV, neemt ook de behoefte aan flexibiliteit en tijdelijke opslag van energie toe. *Pumped (hydro) storage power plants* (PSPP's) kunnen hier een deel van de oplossing zijn (totaalrendement circa 75 procent).

Opslag met een PSPP is per kilowattuur het goedkoopst van alle bestaande grootschalige opslagvormen (IEA 2008). De technologie is robuust, relatief eenvoudig en grotendeels uitontwikkeld. Daarnaast is een PSPP, met een responstijd van circa 1 minuut, snel inzetbaar. De mogelijkheden voor PSPP hangen sterk samen met de geografische kenmerken van het terrein, omdat een hoogteverschil aanwezig moet zijn of gecreëerd moet kunnen worden. We vinden daarom vooral toepassingen in bergachtige gebieden, hoewel ook bij dijken mogelijkheden bestaan.

De huidige pumped storage productiecapaciteit in het Europese elektriciteitsnetwerk is volgens gegevens van ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) ongeveer 45 gigawatt elektrisch (GWe), de opslagcapaciteit 180 TWh (zo'n 5 procent van de mogelijke jaarlijkse productie rond 2050 in Europa). Ongeveer twee derde van de opslagcapaciteit staat in Noorwegen, Zweden en Finland (45 procent, 18 procent en 3 procent). Een adequate netwerkverbinding tussen Europese landen is hierbij uiteraard een vereiste.

Veel van de bestaande PSPP's hebben als doel pieken in de dagelijkse elektriciteitsbehoefte en het aanbod te kunnen opvangen. Dit soort PSPP's zijn dan ook na vier tot negen uur pompen vol dan wel leeg. Voor de bouw van PSPP's met een vergelijkbare capaciteit zijn in Nederland wel plannen ontwikkeld: een ondergrondse PSPP in het Limburgse kolenmijngebied met een capaciteit van 8 GWh en een PSPP langs de Afsluitdijk bestaande uit een groot gat van 3 kilometer doorsnee en 40 meter diep met een capaciteit van 1,2 GWh. PSPP's in met name Noorwegen, Zweden,

Zwitserland en Oostenrijk zijn wel in staat om gedurende langere tijd energie op te slaan.

Hoewel de huidige PSPP-capaciteit in Europa verder wordt uitgebreid, neemt de vraag naar flexibiliteit waarschijnlijk veel sterker toe. Alleen al voor Duitsland wordt geschat dat het opvangen van de variabele productie in 2050 60 GWe vraagt (SRU 2011). Het bestaande PSPP-vermogen van ongeveer 45 GW vertegenwoordigt ongeveer 75 procent van het beschikbare Europese potentieel (European Parliament 2008) en wordt met ongeveer 10 procent vergroot tussen 2010 en 2020.

Technieken in 2050

4.1 Inleiding

Er is een breed scala aan technieken om op termijn tot een CO₂-arm Nederland te kunnen komen. De verwachting is dat de meeste van de technologische opties die in 2050 een grote rol kunnen spelen, nu reeds bekend zijn. Uiteraard zijn er in een periode van veertig jaar nog verrassingen mogelijk in de vorm van schone technieken die nu nog niet in beeld zijn. Maar de kans is klein dat dergelijke technieken een grote rol in het energiesysteem van 2050 zullen spelen. De ervaring leert dat het minstens dertig jaar duurt voordat een nieuwe techniek 1 procent marktaandeel in het energiesysteem heeft veroverd, en dat daarna een geleidelijke toename volgt (Shell 2011). We houden in deze analyse daarom geen rekening met zogenoemde *game-changers*, maar het is goed om in het achterhoofd te houden dat ‘verrassingen’ de sectorale details zouden kunnen omgooien. Overigens is ook het perspectief van de al wel bekende nieuwe technieken onzeker; veelal moeten deze nog een leercurve doorlopen en is er geen zekerheid over toekomstige rendementen en kosten.

In dit hoofdstuk bespreken we de technologieën die zijn meegenomen in de analyses van het systeem in 2050 (anders dan de energiebesparingstechnieken die al in hoofdstuk 2 zijn besproken). Aan de orde komt de mogelijke betekenis van de technieken voor het toekomstige systeem. Daarbij volgen we een hoofdindeling naar sectoren. De ontwikkelingstrajecten voor nieuwe technieken worden besproken in hoofdstuk 6.

4.2 Verkeer en vervoer

Stadsauto's	Personen- en bestelauto's	Zwaar vrachtverkeer	Lucht- en scheepvaart
Micro-verbrandingsmotor*	Verbrandingsmotor*	Verbrandingsmotor*	Verbrandingsmotoren (biobrandstof is alternatief voor fossiele brandstof)
Micro-elektrisch	Hybride	Verbrandingsmotor op gas	
	Verbrandingsmotor op waterstof	Verbrandingsmotor op waterstof	
	Elektrisch	Brandstofcel	
	Brandstofcel		
	Plug-in hybride		

* De verbrandingsmotor kan ook op biobrandstof of groen gas.

De elektromotor is het belangrijkste alternatief voor de verbrandingsmotor. Een belangrijk technisch gegeven daarbij is dat het rendement van de omzetting van energie in brandstof naar bewegingsenergie voor een auto bij de verbrandingsmotor tussen de 30 en 40 procent ligt, en van de omzetting van elektriciteit naar bewegingsenergie in de accu/elektromotor tussen de 75 en 90 procent. Als waterstof als brandstof wordt gebruikt, zijn beide typen motoren in principe denkbaar. Voor het aandrijven van een elektromotor moet de waterstof echter eerst in een brandstofcel in elektriciteit worden omgezet. Het rendement van de omzetting van waterstof in bewegingsenergie zal naar verwachting tussen de 50 en 60 procent liggen. Er is onderscheid gemaakt tussen de gemiddelde gezinsauto en de microauto die de laatste jaren al meer in zwang is geraakt. Microauto's rijden aanzienlijk zuiniger. In dat licht kan de elektrische fiets als de extreem zuinige aangedreven variant worden gezien.

In de elektrische auto wordt de energie opgeslagen in een accu. De energiedichtheid daarvan is laag en de accupakketten zijn groot en zwaar. Bovendien bepaalt de opslagcapaciteit in sterke mate de prijs van de accu. Dat alles leidt ertoe dat de actieradius van elektrische auto's beperkt zal zijn. In hoeverre in de toekomst snelladen onderweg mogelijk wordt zonder dat de levensduur van de accu er onder lijdt, is nog onduidelijk. In de analyse houden we er daarom rekening mee dat een elektrische auto minder geschikt zal zijn voor reizen over lange afstanden. Er is aangehouden dat met elektrische auto's maximaal 60 procent van de verreden kilometers wordt afgelegd. Het rijden met plug-in hybrides kan het probleem van de actieradius ondervangen. De grootte van het accupakket en het gebruik van de auto bepalen dan het deel van de totaal verreden kilometers dat op elektriciteit gaat. De plug-in hybride kent verschillende varianten. Combinaties met fossiele brandstof en met waterstof zijn mogelijk, ook combinaties met twee motortypen of de omzetting van brandstof in elektriciteit in de auto (ook wel aangeduid met *range extender*). De optie elektrisch rijden is niet meegenomen voor vrachtverkeer vanwege de lage energiedichtheid van de accu. Die zou het benodigde accupakket erg groot maken.

Brandstofcelauto's op waterstof lijken in de huidige situatie iets minder in beeld dan de elektrische auto, maar bieden het voordeel van een grotere actieradius. Bovendien kunnen ze in principe worden bijgetankt. In de keten met waterstof is sprake van meer omzettingen en dus van grotere omzettingsverliezen. Vrachtwagens zouden ook op waterstof kunnen rijden, zowel met een verbrandingsmotor als met een brandstofcel en elektromotor. We hebben echter geen voorbeelden gevonden van concrete ontwikkelingen in deze richting of van demonstratiewagens (anders dan bijvoorbeeld voor bussen). Toch is deze optie in enkele analyses meegenomen, omdat waterstof voor vrachtverkeer over lange afstanden over de weg vooralsnog het enige alternatief is voor koolwaterstoffen.

Er zijn ook ontwikkelingen in de richting van rijden op aardgas in plaats van op vloeibare brandstoffen. Bij de huidige technische ontwikkelingen zijn de verwachte emissies niet veel lager dan van vloeibare fossiele brandstoffen. De vervanging van fossiele brandstof door biobrandstof is een belangrijke stap om op systeemniveau tot vermindering van emissies te komen, maar de overgang op gas lijkt voor personenauto's van weinig meerwaarde. Voor lucht- en scheepvaart zijn er geen alternatieve aandrijvingstechnieken geëvalueerd. Wel kan vloeibare biobrandstof worden ingezet.

4.3 Warmtevoorziening in de gebouwde omgeving

Voor de gebouwde omgeving zal de basistechnologie van dit moment, de gasgestookte HR-ketel, in 2050 waarschijnlijk een veel kleinere rol spelen. Maar het lijkt

Bestaande woningen	Nieuwe woningen	Utiliteitsbouw
HR-ketels	HR-ketels	HR-ketels
Microwarmtekrachtkoppeling op gas	Microwarmtekrachtkoppeling op gas	Microwarmtekrachtkoppeling op gas
Warmtepompen	Microwarmtekrachtkoppeling op waterstof	Microwarmtekrachtkoppeling op waterstof
Zonneboiler	Warmtepompen	Warmtepompen
Geothermie	Warmte-koudeopslag	Warmte-koudeopslag
Restwarmte	Zonneboiler	Zonneboiler
Elektrische boiler	Geothermie	Geothermie
	Restwarmte	Restwarmte
	Elektrische boiler	

onwaarschijnlijk dat deze techniek in 2050 helemaal niet meer nodig is in bestaande woningen en gebouwen. Microwarmtekrachtkoppeling op gas – waarmee zowel warmte als elektriciteit wordt opgewekt – wordt wel gezien als de volgende generatie verwarmingsapparatuur om nog efficiënter met de brandstof om te kunnen gaan. De betekenis van deze technologie voor de vermindering van de broeikasgasemissies op systeemniveau hangt sterk af van de wijze waarop in 2050 elektriciteit centraal wordt geproduceerd. Hoe schoner die productie, des te kleiner de meerwaarde van

microwarmtekrachtkoppeling. Uiteindelijke toepassing hangt daarnaast sterk af van de kosten van gas in Nederland. Op termijn vormt de brandstofcel op waterstof wellicht een alternatief. Daarmee wordt relatief meer elektriciteit geproduceerd, wat zou kunnen inspelen op een verwachte verschuiving in de gebouwde omgeving naar meer elektriciteitsvraag en minder warmtevraag.

Warmtepompen kunnen op gas en op elektriciteit draaien. Uitgaande van de diversiteit aan opties om schone elektriciteit te produceren, passen vooral de elektrische warmtepompen in een toekomstbeeld waarin elektriciteit een nog belangrijker energiedrager wordt. De inzet van warmtepompen voor woningen en gebouwen is vooral efficiënt als de gevraagde temperatuur niet te hoog hoeft te zijn (circa 40 tot 55°C). Daarom zijn warmtepompen vooral geschikt voor goed geïsoleerde woningen met vloer- en muurverwarming. Dit betekent dat ze vooral bruikbaar zijn in nieuwbouw. Voor bestaande woningen met ‘normale’ radiatoren kunnen echter ook hybride systemen (combinaties van HR-ketels en warmtepompen) worden ingezet (ECN 2011b). Bij de utiliteitsbouw is er ook een aanzienlijke vraag naar koeling. Met een warmte-koudeopslaginstallatie in combinatie met een warmtepomp kan in warmte en koeling worden voorzien, waardoor de optie kostentechnisch ook aantrekkelijk wordt.

In gebieden waar de ondergrond geschikt is, kan ook geothermie worden toegepast. De temperatuur van het water is doorgaans hoog genoeg om bestaande huizen en gebouwen te verwarmen. Vervanging van verwarmingsinstallaties en vergaande isolatie zijn niet nodig. Wel kan de aanleg van het warmtenet – noodzakelijk om de warmte uit de bron naar de huizen en gebouwen te transporteren – in bestaande wijken problematisch zijn. Voor restwarmte gelden in principe dezelfde toepassingsmogelijkheden (hoge temperatuur) en beperkingen (warmtenet nodig). Een mogelijke extra beperking is dat het restwarmteaanbod bij een groot aandeel wind en zon in de elektriciteitsopwekking in de toekomst wellicht lager is dan nu.

Voor woningen kan met verregaande isolatie de vraag naar ruimteverwarming aanzienlijk worden teruggebracht. Anders ligt dit voor warm tapwater, warm water voor wassen en douchen. Absoluut gezien blijft het gebruik hiervan ongeveer gelijk aan nu. De temperaturen van geothermie en restwarmte zijn hoog genoeg om hierin te voorzien, maar dat geldt niet voor warmtepompen. Gezien de hogere temperaturen in tapwater zijn deze weinig geschikt om hierin te voorzien, omdat het energetisch rendement dan erg laag wordt en er nauwelijks energie wordt bespaard. Zonneboilers bieden hiervoor een alternatief, maar (vooral) in de winter niet zonder bijstook van een conventionele verwarmingsinstallatie. Opslag van de warmte over het seizoen zou daarvoor wenselijk zijn, maar de haalbaarheid daarvan is uiterst onzeker. Bij warmte-koudeopslag kan de warmte van zonneboilers wel aan het grondwater worden toegevoegd en zo worden bewaard, maar niet op dezelfde temperatuur. Voor warm tapwater zijn daarom toch aanvullende systemen nodig, zoals een elektrische boiler.

4.4 Industrie (exclusief olieketen)

Warmteproductie bedrijven	Staalproductie	Productie ammoniak	Overige procesemissies
Ketels/warmtekrachtkoppeling met <ul style="list-style-type: none"> - keuze brandstof (gas, biomassa, waterstof) - CO₂-afvang als optie Warmtepompen	Huidige hoogovens <i>Direct reduction</i> -proces Hlsarna-proces Alle met CO ₂ -afvang als optie	Huidig proces met CO ₂ -afvang als optie Proces op basis van elektriciteit	Alternatieve koelmiddelen (en diverse alternatieve processen in verschillende sectoren)

In vele industriële processen is warmte nodig. Veel bedrijven hebben dan ook eigen ketelhuizen of warmtekrachtkoppelinginstallaties om deze warmte op te wekken. Aardgas is de belangrijkste energiebron, biomassa een soms al toegepast alternatief. Welke technieken nog meer in aanmerking komen voor een CO₂-armere warmteopwekking is afhankelijk van de benodigde temperatuur. Voor relatief lage temperaturen (tot maximaal 200°C) kunnen warmtepompen worden ingezet, maar voor hogere temperaturen is de inzet van brandstoffen (voor stoomopwekking of directe ondervuring) of eventueel elektriciteit nodig. Als aardgas als brandstof wordt gebruikt, is het van belang dat de vrijkomende CO₂ wordt afgevangen. Voor kleinere installaties – en dat zijn er vele – is deze afvang waarschijnlijk niet haalbaar. We veronderstellen dat CO₂-afvang alleen zal worden toegepast bij grote bedrijven, en ramen dat daarmee maximaal 80 procent van de totale warmteopwekking (inclusief warmtekrachtkoppeling) kan worden voorzien. Dat percentage bepaalt in belangrijke mate de restemissies in 2050. We beschouwen die 80 procent als redelijk optimistisch. Ook bij grote bedrijven kan de mogelijkheid beperkt zijn om de CO₂ af te voeren – bijvoorbeeld vanwege een ongunstige locatie. Clustering van bedrijven met grote emissies op gunstige locaties voor afvoer biedt dan voordelen.

Elektriciteit wordt in de praktijk met enkele specifieke processen ingezet, zoals in de basismetalenindustrie. Het is echter onduidelijk in hoeverre dit een alternatief is voor vele andere processen waar in de huidige situatie aardgas wordt gebruikt. Ook waterstof zou een schoon alternatief kunnen zijn dat in de analyses is meegenomen.

Daarnaast zijn er specifieke industriële processen met flinke emissies. We bespreken kort de belangrijkste, om te beginnen met de staalproductie. De staalproductie is een grote emissiebron. Bij het staalproces worden kolen ingezet, maar slechts een verwaarloosbaar deel van de koolstof komt in het product. De rest van de koolstof wordt uiteindelijk omgezet in CO₂. De belangrijkste opties zijn afvang van CO₂ en vervanging van het huidige proces door een nieuwe productietechnologie. Het nu in ontwikkeling zijnde Hlsarna-proces is daarvan een voorbeeld. In de huidige situatie gaan een sinterfabriek voor ertsverwerking en een cokesfabriek vooraf aan het proces

in de hoogoven. Het nieuwe proces combineert koolpyrolyse, een smeltcyclus en een smeltbad voor het reduceren van het ijzererts. Hierdoor is het geschikter voor de afvang van CO₂. Zonder CO₂-afvang zou de emissiereductie ten opzichte van het hoogovenproces al zo'n 20 procent kunnen zijn, met afvang zelfs meer dan 90 procent. Een andere procesvariant is een *Direct Reduction*-proces, waarin gas in plaats van kolen wordt ingezet. Er kan een efficiëntieverbetering van het directe energiegebruik van 15 tot 35 procent worden gerealiseerd door de genoemde nieuwe technieken, waar een bijna evenredige toename van het elektriciteitsgebruik tegenover staat.

Binnen de chemie waren de salpeter- en caprolactamproductie aanzienlijke bronnen van lachgas (N₂O). De afgelopen jaren is al een aanzienlijk reductie bereikt. Door toepassing van de nieuwste technieken zal de restemissie van de salpeterzuurproductie op termijn niet meer dan 0,1 megaton (Mton) CO₂-equivalent bedragen. Het is zeer onzeker of er in 2050 nog caprolactamproductie in Nederland aanwezig zal zijn. Bij de klinkerproductie in Maastricht komt circa 0,35 Mton CO₂ vrij. Door het beëindigen van de kalksteenwinning en sluiting van de cementklinkeroven zal deze bron nog voor 2020 zijn verdwenen.

Er bestaan veel verschillende fluorkoolwaterstoffen (HFKs), waarvan een groot aantal een zeer sterke broeikaswerking heeft. Veel HFKs worden als koudemiddel toegepast in stationaire en mobiele toepassingen. Vervanging van dergelijke verbindingen door andere stoffen die geen of een veel beperkte broeikas effect hebben is dan effectief. Een van de sterkst opwarmende HFKs (HFK-23) komt vrij bij de productie van HCFK-22, dat wordt geproduceerd als grondstof voor kunststoffen zoals teflon. Optimalisatie van het proces en de naverbranding kan deze emissies terugbrengen. Ook vervanging in de halfgeleiderindustrie en andere toepassingen kan bijdragen aan verdere vermindering. Voor 2050 gaan we uit van een restemissie van 0,6 Mton CO₂-equivalent.

4.5 Raffinaderijen, petrochemie en chemie

Productie vloeibare brandstoffen	Productie plastics
Olieraffinage met CO ₂ -afvang als optie	Grondstoffen
Vergassing biomassa met CO ₂ -afvang als optie	- nafta
en Fischer-Tropsch-synthese*	- biomassa
Verestering plantaardige olie	met CO ₂ -afvang als optie
Fermentatie zetmeel/suiker	
Fermentatie lignocellulose	

* Fischer-Tropsch-synthese is een proces om uit CO en H₂ vloeibare brandstoffen te maken.

Belangrijke maatregelen in de olieketen om emissies te beperken, zijn de afvang van CO₂ en het gebruik van biomassa in plaats van olie als grondstof. De transitie voor de raffinaderijen en de petrochemie zal zich vooral kenmerken door het (blijven) inspelen

op veranderingen in zowel de in te zetten grondstoffen als de gevraagde producten. Het recyclen van plastic draagt ook bij aan een vermindering van de vraag naar ruwe olie.

Het gebruik van biobrandstoffen, elektrificatie in de vraagsectoren en een eventuele opmars van bioplastics zullen de vraag naar olieproducten beïnvloeden. Een ontwikkeling naar elektrisch rijden of rijden op waterstof zou ertoe kunnen leiden dat de vraag naar benzine en mogelijk diesel drastisch afneemt. Er is momenteel een trend naar meer diesel en minder benzine. Voor de benzinefractie zou dan nauwelijks afzet meer zijn, hoewel een lagere prijs het dan weer aantrekkelijker zou kunnen maken. Daar staat een groeiende vraag naar vliegtuigbrandstof (kerosine) tegenover, al zoekt men daar ook naar biobrandstof als alternatief. Zware stookolie wordt nu nog geleverd aan de scheepvaart, maar de milieueisen voor de sector leiden ertoe dat er veel meer vraag zal komen naar hoogwaardigere, schonere brandstof (zoals diesel, zwavelarm), en dat er voor de zware stookolie geen afzetmarkt meer zal zijn.

Ook aan de grondstofkant vinden veranderingen plaats. Ruwe olie uit verschillende bronnen (en landen) varieert nogal in samenstelling. De verwachting is dat de olie die in Nederlandse raffinaderijen wordt verwerkt steeds zwaarder (moleculen met langere en complexere koolstofketens) en zwavelrijker zal worden. Daarbij is het een optie om het aandeel biograndstof te vergroten door pyrolyseolie of de meest geschikte fractie daaruit te mengen met de ruwe olie, eventueel in combinatie met meer kraakprocessen of behandeling met waterstof voor kwaliteitsverbetering van de producten. Alles bij elkaar betekent het dat de raffinaderij van de toekomst technisch complexer wordt. Voor verwerking van de zware fracties zijn extra processtappen te verwachten. Dat zal naar verwachting gepaard gaan met meer energiegebruik en potentieel hogere emissies.

Er zijn diverse specifieke processen om vloeibare biobrandstof te produceren. Verwerking van suiker, zetmeel en plantaardige oliën gebeurt al op uitgebreide schaal. In de analyses zijn deze routes beperkt ingezet vanwege onzekerheid over het duurzame potentieel van deze grondstoffen. Ontwikkelingen richten zich vooral op de verwerking van droog hout of houtachtig materiaal (lignocellulose). De optie vergassing levert in een eerste stap productgas, een mengsel van waterstof, koolstofmonoxide, CO₂ en methaan, waaruit brandstoffen, zoals diesel, van hoge kwaliteit kunnen worden gemaakt via Fischer-Tropsch-synthese, een proces om uit koolstofmonoxide en waterstof vloeibare brandstoffen te maken. Ongeveer een derde van de koolstof wordt als CO₂ uit het productgas verwijderd, dus afvang en opslag van CO₂ is bij dit proces goed mogelijk. Daarom biedt deze technologie goede mogelijkheden om negatieve emissies te realiseren. Ook de fermentatieroute van houtachtig materiaal, zoals tarwestro, biedt perspectief voor de productie van ethanol.

Beide routes vormen ook een alternatief voor de petrochemie. Combinaties zijn daarom in de toekomst zeker mogelijk. Ook in de petrochemie is er de uitdaging met meer biograndstoffen te blijven voldoen aan de vraag naar een brede range van producten (zie hoofdstuk 6). In onze analyses is de alternatieve productie van etheen – het product

met de grootste omvang – op basis van biomassa (uit bio-ethanol of syngas) daarvoor het uitgangspunt geweest. Uiteindelijk komt een groot deel van de koolstof in plastics terecht. Vroeger (bijvoorbeeld bij verpakingsafval) of later (bouwmaterialen) komt de koolstof vrij als CO₂, voor een belangrijk deel bij afvalverbrandingsinstallaties. Nederland exporteert een groot deel van de chemische producten, zodat de meeste van deze emissies in het buitenland optreden. Vervanging van fossiele olie als grondstof door biomassa heeft daarom een beperkt effect op de emissies in Nederland.

4.6 Elektriciteitsvoorziening

Elektriciteitsproductie	Elektriciteitsopslag	Elektriciteitsnetten
Kolencentrales (poederkool en vergassing) met opties: - CO ₂ -afvang - biomassa meestook Gascentrales met CO ₂ -afvang als optie (turbines voor piekvraag) Windmolens (zee en land) Kerncentrales Zon-PV Geothermie	Pumped storage in oude mijnen in Nederland Accu's Gecomprimeerde lucht Methaangas	Slimme netten: - vraagsturing huishoudelijk gebruik - vraagsturing elektrische auto's Interconnectiecapaciteit met buitenland (balancing vraag en aanbod)

De mogelijke aantrekkelijkheid van een *all-electric*-variant voor het systeem van de toekomst is gebaseerd op de verschillende mogelijkheden om CO₂-vrije elektriciteit te produceren. Elektriciteit uit wind, zon, kernenergie en geothermie zijn wat betreft hun potentieel al in het vorige hoofdstuk besproken. Deze opties staan naast de technieken die nu het beeld in Nederland domineren: gas- en kolencentrales. Ook deze kunnen door CO₂-afvang en meestook van biomassa tot lage emissies worden gebracht. Een kolencentrale met voldoende meestook van biomassa en afvang van CO₂ kan zelfs tot negatieve emissies leiden, maar doet daarvoor wel een aanzienlijk beroep op de voorraad biomassa en de opslagcapaciteit voor CO₂.

Voor een betrouwbare elektriciteitsvoorziening moeten vraag en aanbod op elkaar worden afgestemd. Met de toename van het aandeel hernieuwbare elektriciteit van wind en zon ligt daarin een nieuwe uitdaging. Deze hernieuwbare bronnen zijn minder voorspelbaar en beperkt regelbaar. Er bestaat een zestal mogelijke oplossingsrichtingen (D-Cision 2010; ECN 2009d; Tennet 2008):

1. Grotere flexibiliteit van de elektriciteitsvraag; in het marktspel kunnen op basis van prijsstelling bedrijven die elektriciteit gebruiken tot op zekere hoogte snel inspelen op de variatie in het aanbod.
2. Meer uitwisseling of interconnectie met het buitenland en daarbij behorende marktregels; hoe groter de schaal, des te minder grillig zijn de vraag- en aanbodpatronen.

3. Elektriciteitsopslag; er zijn verschillende mogelijkheden:
 - a. *pumped storage*, al besproken in hoofdstuk 3; in Nederland kan eventueel hoogteverschil worden gevonden bij de benutting van oude mijnen, of hoogteverschil worden gecreëerd in het IJsselmeer of de Noordzee, maar de capaciteit is beperkt;
 - b. *accu's* of *compressed air*, dit zijn technische opties voor opslag voor korte duur (tot tientallen uren), die nog verdere ontwikkeling vergen;
 - c. omzetting in waterstof en eventueel – in een vervolgstap – in koolwaterstoffen; methaan kan worden opgeslagen in de gasinfrastructuur of gasvelden.
4. Meer flexibiliteit van het overige productievermogen; voor pieken worden nu vooral gasturbines ingezet, maar ook de flexibiliteit van centrales voor de basislast op basis van gas, kolen en zelfs kernenergie wordt groter.
5. Betere regelbaarheid en voorspelbaarheid van het intermitterende productievermogen op basis van weersverwachtingen, mogelijk gecombineerd met het verkorten van de periode tussen de sluiting van de markt en de levering van elektriciteit, waardoor de onzekerheidsmarge afneemt.
6. Slimme netten; op basis van gegevens over het aanbod kan de vraag in bijvoorbeeld bedrijven, huishoudens en voor het opladen van elektrische voertuigen in zekere mate worden gestuurd.

Deze opties (met uitzondering van optie 5) zijn voor een belangrijk deel meegenomen in de analyses op systeemniveau (zie hoofdstuk 5).

4.7 Productie gas: methaan en waterstof

Productie methaangas	Productie waterstof
Aardgas	Elektrolyse
Vergisting	Thermo-elektrolyse
Vergassing biomassa met CO ₂ -afvang als optie	Vergassing biomassa met CO ₂ -afvang als optie
Hernieuwbaar gas (op basis van CO ₂ en elektriciteit/waterstof)	<i>Steam reforming</i> uit methaan met CO ₂ -afvang als optie

Het huidige Nederlandse energiesysteem is voor een belangrijk deel gebaseerd op aardgas. Hoewel de emissies van aardgas kleiner zijn dan die van andere fossiele brandstoffen, zijn ze toch zo substantieel dat het onmogelijk is bij voortzetting van het huidige aardgasgebruik een vermindering met 80 procent te realiseren. Aardgas biedt echter veel flexibiliteit en de beschikbare gasinfrastructuur in Nederland maakt dat dit voordeel goed wordt benut. Daarom wordt in Nederland gezocht naar oplossingen waarbij die voordelen zo veel mogelijk kunnen worden behouden.

Er zijn twee mogelijkheden om methaangas op een andere wijze dan via winning uit gasvelden te produceren: groen gas en e-gas. Groen gas wordt geproduceerd uit

biomassa. Vergisting wordt al toegepast in Nederland. Een technologie om het toekomstige aanbod van droge biomassa uit het buitenland aan te wenden voor de productie van gas, is vergassing met de mogelijkheid om de CO₂-emissies af te vangen en zo negatieve emissies te realiseren. Met vergassing wordt in een eerste stap een 'productgas' geproduceerd (zie ook paragraaf 4.5). In volgende stappen wordt hieruit methaan of waterstof afgescheiden. Er zijn ook andere technieken in ontwikkeling met mogelijk vergelijkbare betekenis voor het systeem. Bij productie van methaan kan ongeveer een derde van de koolstof die het proces ingaat worden afgevangen.

De naam e-gas duidt op de inzet van elektriciteit voor de productie van methaan (Sternier 2009). In een elektrolyseproces wordt met deze elektriciteit water gesplitst in waterstof en zuurstof. De waterstof kan verder reageren met CO₂ tot methaan, maar eventueel ook tot andere koolwaterstoffen, zoals methanol. Aan methanolproductie wordt in Duitsland en IJsland al gewerkt (Carbon Recycling 2011; Wuppertal Institut 2011). Wellicht liggen er mogelijkheden om de laatste stap te combineren met biomassavergassing. Het interessante van deze optie is de mogelijkheid om het overaanbod aan hernieuwbare elektriciteit te benutten, CO₂ te hergebruiken en energie te kunnen opslaan: drie vliegen in één klap. Echter, als er een niet-continu aanbod van elektriciteit is, betekent dat ook dat de capaciteit voor elektrolyse om waterstof te produceren niet optimaal wordt benut. Daardoor kan de waterstofproductie duur uitvallen. Als het geproduceerde e-gas wordt ingezet, komt de CO₂ alsnog in de lucht, maar wel in plaats van CO₂ uit aardgas. Daarmee is de cyclus van e-gas vergelijkbaar met die van groen gas.

Het is uiteraard ook mogelijk de waterstof direct te benutten. Dat hangt niet alleen samen met de keuze in andere sectoren voor processen op basis van waterstof. Het is ook mogelijk een deel van de waterstof bij te mengen in het aardgasnet, in ieder geval tot 10 procent. Als er veel zon-PV wordt ingezet, zou er in de zomer veel waterstof worden geproduceerd. Juist in die periode is het gasverbruik echter relatief laag, zodat er maar weinig aardgas door het net stroomt en ook minder waterstof kan worden bijgemengd.

In de huidige situatie wordt er geen methaan gemaakt uit waterstof, wel waterstof uit methaan voor enkele specifieke industriële toepassingen. Er is de mogelijkheid de daarbij vrijkomende CO₂-emissies voor een belangrijk deel af te vangen. Daarnaast kan waterstof ook op verschillende manieren worden geproduceerd uit diverse typen biomassa, onder andere uit het syngas van biomassavergassing. Daarbij kan – in tegenstelling tot bij de productie van groen gas – alle koolstof uit het productgas worden afgevangen en opgeslagen. In dat opzicht scoort waterstof veel beter dan methaan. Methaan heeft echter als belangrijk voordeel dat het is te gebruiken in de bestaande infrastructuur en gasinstallaties, en dat het gemakkelijker kan worden opgeslagen. Voor waterstof is een nieuwe infrastructuur nodig.

4.8 Landbouw

Glastuinbouw	Veehouderijen	Landgebruik
Warmtekrachtkoppeling op gas Ketels op biomassa Warmtepompen Geothermie	Aanpassen rantsoen melkvee (Co-)vergisting mest Methaanfilter op melkveestallen	Precisiebemesting Gebruik van nieuwe kunstmeststoffen Peilbeheer veenweidegebieden

De huidige warmtevraag van de landbouw – circa 90 petajoule (PJ), vooral voor de glastuinbouw – wordt vrijwel volledig gedekt via aardgasgestookte ketels of warmtekrachtkoppeling. Als alternatief voor gas zou kunnen worden gestookt op restproducten uit de landbouw. Aan de benodigde (lage temperatuur) warmtevraag kan ook worden voldaan met gasgestookte of elektrische warmtepompen, geothermie, betere benutting van zonnewarmte of met restwarmte van andere bedrijven. De CO₂ die wordt toegevoegd voor snellere gewasgroei dient te worden vastgehouden in gesloten kassystemen. Die CO₂ kan eveneens worden betrokken van andere bedrijven. Kassen kunnen om die redenen aantrekkelijke burens zijn voor andere bedrijven.

In het referentiebeeld is verondersteld dat landbouwsector in 2050 circa 16 Mton CO₂-equivalent emitteert in de vorm van methaan (9 Mton CO₂-equivalent) en lachgas (7 Mton CO₂-equivalent). De methaanemissie ontstaat vooral bij pens- en darmfermentatie door koeien en opslag van mest. De emissie van lachgas wordt vooral veroorzaakt door het gebruiken van dierlijke mest en kunstmest. Met verschillende maatregelen kan de emissie van methaan en lachgas worden vermindert tot 11 Mton CO₂-equivalent.

De productiviteit per melkkoe kan verder toenemen, waardoor een kleinere veestapel nodig is om een zelfde melkproductie te realiseren. Deze koeien zullen dan wel meer moeten eten en per koe meer mest produceren. Ook kan de levensduur van de melkveestapel worden verlengd, waardoor minder jongvee nodig is. In combinatie met rantsoenaanpassingen (onder andere het gebruik van additieven en vervanging van gras door snijmais) om de methaanproductie in koeien te remmen, zou de methaanemissie met ruim 1 Mton CO₂-equivalent kunnen dalen.

Door mest snel te vergisten hoeft deze minder lang te worden opgeslagen en kan de methaanemissie uit mestopslagen met zo'n 95 procent verminderen (-2,4 Mton). Bij vergisting van mest ontstaat biogas, dat voor energietoepassingen kan worden gebruikt. Er ontstaat ook digestaat, wat een hoogwaardige vervanger kan zijn van dierlijke mest. Hierdoor zou ook minder kunstmest nodig zijn, waardoor ook de lachgasemissie van mestgebruik kan afnemen. Het totale mestgebruik in Nederland kan zo'n 20 procent dalen zonder verlies aan gewasopbrengst (CLM 2008). De lachgasemissie kan verminderen door naast het gebruik van digestaat

precisiebemesting toe te passen, waarbij IT-systemen worden gebruikt om een afgepaste hoeveelheid mest toe te dienen. Verdere vermindering kan worden gerealiseerd door gebruik van nieuwe kunstmeststoffen, zoals nitrificatieremmers, en minder eiwitrijk veevoer – dit laatste leidt tot minder stikstof in de mest. In totaal zou de lachgasemissie dan met zo'n 1,5 Mton CO₂-equivalent kunnen dalen.

In aanvulling op bovengeschetste maatregelen is het ook denkbaar om de lucht van koeienstallen te filteren, waardoor de methaanemissie verder vermindert. Maximaal zou dit tot 2-3 Mton CO₂-equivalent extra reductie kunnen leiden, maar de haalbaarheid ervan is nog erg onzeker.

Ook kan er worden geschoven in het voedingspatroon. Volgens (PBL 2011b) is de eiwitconsumptie per persoon in Nederland ongeveer 30 kilogram per jaar. Deze hoeveelheid ligt ongeveer 70 procent boven het advies van de Gezondheidsraad (2001) (ongeveer 18 kilogram per jaar op basis van een gezond gewicht). Dit houdt in dat er ruimte is om de consumptie van (dierlijke) eiwitten te verminderen. Het is echter lastig om consumenten te verleiden om minder dierlijke eiwitten te eten (Regmi & Gehlhar 2001), ook al heeft het aanzienlijke gezondheidsvoordelen. Afname van de Nederlandse consumptie houdt bovendien niet in dat de dierlijke productie in Nederland afneemt, aangezien een afnemende binnenlandse vraag in de open Nederlandse economie mogelijk wordt gecompenseerd met een toename van de export (MNP 2007). Een kleinere consumptie van dierlijke producten zorgt er wel voor dat op wereldschaal de emissie van overige broeikasgassen afneemt. In dat licht zorgt een afname dus voor een verkleining van het broeikas effect en voor deze studie is dit aan Nederland toegerekend. Hierbij zijn twee opmerkingen op zijn plaats. Allereerst is het niet zeker dat een afname in de consumptie van eiwitten in Nederland tot een (zelfde) afname in de wereldwijde productie van eiwitten leidt. Ten tweede kunnen besparingen in de uitgaven door huishouden leiden tot verschuiving naar de consumptie van andere goederen en diensten, die eveneens met broeikasgasemissies gepaard kunnen gaan.

Met deze kanttekeningen in het achterhoofd zijn in deze studie twee opties voor het schuiven in het voedingspatroon gekwantificeerd:

- Absolute vermindering van de consumptie van dierlijke eiwitten per persoon (vermindering met 40 procent, tot de door de Gezondheidsraad aanbevolen dagelijkse hoeveelheid). Dit zou een maximale (mondiale) emissiereductie betekenen van 1,2 tot 1,6 Mton CO₂-equivalent.
- Verschuiving van consumptie van rood vlees (rund- en varkensvlees) naar wit vlees (vis en pluimvee). Dit zou een (mondiale) emissiereductie betekenen van maximaal 3,5 tot 4,0 Mton CO₂-equivalent.

Daarnaast is een kleinere consumptie ook mogelijk door het beperken van voedselverliezen. Als in Nederland de huidige verliezen van circa 20 procent halveren, kan dit op mondiaal niveau een emissiereductie van circa 2 Mton CO₂-equivalent betekenen. Hiervoor is ervan uitgegaan dat de productie met de huidige technieken

gebeurt. Als deze emissiearmer worden, neemt het potentieel van bovengenoemde opties uiteraard af.

De CO₂-emissie als gevolg van oxidatie van veen bedroeg 4,2 Mton in 2009, maar telt niet mee in internationale emissierapportages, en is in deze studie ook niet meegenomen bij het doel van 80 procent. Door het waterpeil te verhogen (en ook het landgebruik daarop aan te passen), zou de CO₂-emissie met 1,3 Mton CO₂ kunnen verminderen. Hierdoor zou ook de lachgasemissie afnemen met 0,35 Mton CO₂-equivalent (PBL 2011c).

4.9 Overige emissies

Stortplaatsen zijn in de huidige situatie nog aanzienlijke bronnen van methaangas. Als we er overeenkomstig de huidige beleidslijn van uitgaan dat in de toekomst geen organisch afval meer zal worden gestort, dan zullen de emissies van de nog bestaande stortplaatsen met de tijd afnemen. Voor 2050 is de verwachting dat de restemissie onder de 0,2 Mton CO₂-equivalent komt. Rioolwaterzuiveringsinstallaties zijn een bron van zowel methaan als lachgas. Verdere emissiereductie tot 0,6 Mton CO₂-equivalent wordt haalbaar geacht.

Het energiesysteem in 2050

5.1 Inleiding

In de vorige hoofdstukken hebben we een indruk gegeven van de technische mogelijkheden om te besparen op het energiegebruik, hernieuwbare voorraden te benutten en schone technieken in te zetten. Het is een veelheid van opties met verschillende karakteristieken en mogelijkheden. Daarin zijn enkele hoofdlijnen te herkennen voor een aanpak.

We hebben de opties voor het energiesysteem van 2050 op basis daarvan gegroepeerd tot vier belangrijke bouwstenen: vermindering van de energievraag, inzet van biomassa, CO₂-afvang en -opslag (CCS) en elektriciteitsproductie zonder CO₂-emissies. Vermindering van de energievraag is in alle sectoren mogelijk en staat aan de basis van iedere aanpak. Efficiencyverbetering en technische besparingsopties zijn daarbij belangrijk. Consumptiepatronen zijn echter nog meer bepalend, maar niet gemakkelijk te veranderen.

Biomassa is een hernieuwbare energiebron die zowel olie, kolen als aardgas kan vervangen en daarmee overal in het energiesysteem kan doordringen. Daarmee vormt biomassa een belangrijke bouwsteen voor het toekomstige systeem. Maar duurzame biomassa is niet onbeperkt beschikbaar. Met zo veel opties voor toepassing moeten er wellicht keuzen worden gemaakt.

De afvang en opslag van CO₂ is ook zo'n bouwsteen, omdat er vele emissiebronnen zijn waar de techniek kan worden toegepast. Betrouwbare opslag, betaalbaarheid en beschikbare opslagcapaciteit bepalen de toepassingsmogelijkheden.

Het is eveneens duidelijk geworden dat er veel technische opties zijn om elektriciteit schoon te produceren. In combinatie met een verschuiving bij de energievragende sectoren van brandstoffen naar elektriciteit, biedt dit nog een belangrijke bouwsteen voor een schoon systeem.

Het is zaak uiteindelijk al deze bouwstenen samen te voegen tot een efficiënt en schoon geheel. Dat kan niet door eenvoudigweg de effecten van losstaande maatregelen bij elkaar op te tellen. Daarvoor is de verwevenheid binnen het systeem te groot. Het gaat om het integrale beeld van een nieuw systeem.

In dit hoofdstuk gaan we als het ware op de stoel zitten van de ontwerper van het energiesysteem van de toekomst. We gebruiken daarbij alle bouwstenen uit de vorige hoofdstukken. Het resultaat zal niet één ontwerp zijn dat als beste uit de bus komt. Daarvoor zijn er te veel onzekerheden. Er zijn vele varianten denkbaar waarmee een niveau van broeikasgasemissies kan worden bereikt dat 80 procent lager ligt dan in 1990. We analyseren een groot aantal van die varianten, op zoek naar de robuuste onderdelen, mogelijk belangrijke elementen en niet passende technieken.

5.2 Uitgangspunten voor modelmatige analyses

Voor de analyses van het toekomstige energiesysteem is het model E-Design ingezet. PBL en ECN hebben het model ontwikkeld als instrument voor backcasting. E-Design ondersteunt de gebruiker bij het ontwerp van het energiesysteem in 2050 in Nederland. De hoofdonderdelen in het model, verkeer, industrie, gebouwde omgeving, elektriciteitsvoorziening en brandstoffenproductie, zijn met elkaar verbonden via de energiedragers in het systeem. Daarbij wordt de balans tussen vraag en aanbod kloppend gehouden; voor brandstoffen en warmte voor het jaarlijkse totaal, voor elektriciteit op urniveau, inclusief de uitwisseling met het buitenland. De vijf hoofdonderdelen zijn weer opgesplitst in zestien deelsystemen met elk een scala aan mogelijk inzetbare technieken, waaruit de gebruiker kan kiezen.

Het model omvat gegevens over rendementen en kosten van deze technieken in 2050. Veel technieken zijn nog volop in ontwikkeling. Het blijft uiteraard enigszins koffiedik kijken hoeveel beter en goedkoper ze zullen worden dan ze nu zijn. Verscheidene deskundigen hebben verwachtingen daarover uitgesproken. Voor het model is in ruime mate gebruik gemaakt van de inschattingen van het International Energy Agency voor de *Energy Technology Perspectives* (IEA 2010). Daarnaast is onder meer gebruik gemaakt van het Optiedocument (ECN 2010c) met kosten zoals die voor het komende decennium worden geraamd, waarbij op basis van empirische ervaringen met leercurven de

mogelijke resultaten van verdere ontwikkelingen zijn bepaald. Er is voor gekozen zowel optimistische als pessimistische inschattingen in het model bijeen te brengen om de gevoeligheid te kunnen toetsen.

Het model berekent op basis van de gekozen vraagvariant en de technologiekeuzen die de gebruiker heeft gemaakt, hoeveel energiegroestoffen nodig zijn, welke capaciteit nodig is voor de verschillende elektriciteitsproductieopties en hoeveel CO₂-opslagcapaciteit nodig is om vraag en aanbod met elkaar in balans te brengen. Uit de berekening volgt ook de uit die combinatie resulterende emissie van broeikasgassen, de kosten voor energiegroestofverbruik, investeringskosten voor technologieën en infrastructuur en kosten voor *operation and maintenance*. Het model toetst of de resultaten voldoen aan de gestelde maximale toepassing van biomassa, CO₂-opslagcapaciteit, wind, en zonne- en kernenergie, en het gestelde emissiedoel. Als de resultaten niet de gewenste emissie opleveren of ergens de maximale toepassing overschrijden, dan kan de gebruiker zijn keuzen aanpassen. E-Design is erop ingericht om iteratief tot een zinvol resultaat te komen, en optimaliseert niet zelf. Het helpt de gebruiker daarmee inzicht te krijgen in de systeemeffecten van verschillende technologiekeuzen. Voor een iets verdergaande beschrijving van het model wordt verwezen naar de website van het PBL.

Met het model hebben we voor een groot aantal varianten met verschillende randvoorwaarden sluitende oplossingen gezocht. Die varianten verschillen vooral in de inzetbaarheid van de in de inleiding genoemde bouwstenen. We zijn daarbij niet op zoek gegaan naar de 'beste keuze' voor het systeem van 2050, aangezien de vele onzekerheden dat weinig zinvol maakt. Wel worden op basis van de verschillende resultaten uitspraken gedaan over meer en minder 'robuuste' onderdelen. Een onderdeel is als meer robuust aangemerkt wanneer deze in een groter aantal varianten met verschillende uitgangspunten 'noodzakelijk' bleek om het doel te behalen.

Om niet te verdwalen in de veelheid van mogelijke varianten hebben we enkele uitgangspunten voor de analyses vastgelegd, en wel voor de energievraag, de beschikbaarheid van voorraden en ruimte voor technieken, en de mate van elektrificatie. Deze uitgangspunten lichten we eerst kort toe.

5.2.1 Uitgangspunten voor de energievraag

Voor verschillende varianten in de energievraag is het referentiebeeld voor 2050 zoals beschreven in hoofdstuk 2 als uitgangspunt genomen. De vraag naar energie uit verkeer, gebouwde omgeving en processen in industrie en landbouw in dat beeld ligt bijna 15 procent hoger dan de huidige vraag. Daarbij zijn drie aanvullende vraagvarianten samengesteld, die neerkomen op 10, 20 en 30 procent minder energievraag (zie voor de gehanteerde definitie hoofdstuk 2) ten opzichte van dat referentiebeeld. De analyses in hoofdstuk 2 van de energiebesparingsmogelijkheden laten zien dat een vermindering van 30 procent ten opzichte van het referentiebeeld nog haalbaar is. De verdeling van de

Tabel 5.1

Varianten voor de beschikbaarheid van voorraden en ruimte voor technieken in 2050

	Beperkt	Redelijk	Ruim	Zeer ruim
Biomassa (PJ/jaar)	250	500	750	1.000
Opslagcapaciteit voor CO ₂ (Mton/jaar)	25	50	75	100
Geothermie voor warmte (PJ/jaar)	25	50	75	100
Wind op land (TWh/jaar)	5	10	15	20
Wind op zee (TWh/jaar)	70	90	110	130
Kernenergie (TWh/jaar)	20	40	60	80
Oppervlak voor zonne-energie (km ²)	100	200	300	400

besparing over de verschillende sectoren is in lijn gebracht met het potentieel daarvoor in die sectoren.

We beseffen dat 2050 er heel anders uit kan zien dan volgens het referentiebeeld. Daar willen we dan ook niet alles aan ophangen. Voor de analyses van het energieaanbodstelsel gaat het echter vooral om de energievraag en niet om de verhouding tussen activiteitsniveaus en technische besparingsmaatregelen. Een variant waarin bijvoorbeeld de energievraag 10 procent lager is dan in het referentiebeeld, kan zowel het resultaat zijn van een hoge economische groei en veel technische besparingsmaatregelen als van lage groei en minder besparing.

Het is evenmin uit te sluiten dat in 2050 de energievraag nog buiten deze range valt. Als bijvoorbeeld de energievraag lager zou uitvallen door grote veranderingen in de consumptieve sfeer (meer dan 30 procent lager dan in het referentiebeeld), dan vergemakkelijkt dit het halen van een 80 procent vermindering van broeikasgassen. Daarmee zijn dan minder kosten voor technische besparing gemoeid. Bij een sterke economische groei zonder al te veel nadruk op energiebesparing zou de energievraag ook hoger kunnen uitvallen dan in het referentiebeeld. Dat zal de kosten voor een schoon energieaanbod, alsmede de vraag naar biomassa, CO₂-opslagcapaciteit en ruimte voor schone elektriciteitsproductie, doen toenemen. Bij een sterkere groei zal naar verwachting echter ook de procesvernieuwing vlotter verlopen en daarmee het tempo van energiebesparing hoger zijn. Bij lagere groei is dat net andersom.

5.2.2 Uitgangspunten voor de beschikbaarheid van voorraden en ruimte

Ook voor de beschikbaarheid van fysieke voorraden en ruimte en daarmee voor het potentieel van bepaalde technieken of groepen van technieken zijn verschillende pakketten gekozen (zie tabel 5.1). We hanteren daarbij de aanduidingen beperkt, redelijk, ruim en zeer ruim voor de herkenbaarheid bij de presentatie van de resultaten. Daarbij realiseren we ons dat in de woordkeuze al beoordelingen van die voorraden

Tabel 5.2

Varianten voor de mate van elektrificatie en inzet van waterstof

Sector en toepassing	Maximale inzet van elektriciteit en waterstof (% van energie-inzet)	
	Variant beperkte inzet	Variant verregaande inzet
Wegverkeer *	40	80
Warmte in de gebouwde omgeving	60	80
Warmte in de industrie **	20	65
Tuinbouw	70	95

* Betrokken op de benodigde (bewegings)energie.

** Betrokken op processen die nu op fossiele brandstof of biomassa draaien.

schuilen, die gezien de onzekerheden zoals beschreven in hoofdstuk 3 niet al te absoluut kunnen worden gesteld.

5.2.3 Uitgangspunten voor de mate van elektrificatie

Er is een ruim aanbod aan technische mogelijkheden bij de verschillende energievragende sectoren die bepalend zijn voor het type energiedrager dat wordt gevraagd. Technieken als elektrische voertuigen en elektrische warmtepompen bepalen in belangrijke mate het potentieel voor elektrificatie (zie tabel 5.2). Maar ook waterstof als energiedrager past daarbij. Waterstof kan immers ook via elektrolyse uit elektriciteit worden geproduceerd en daarmee onderdeel zijn van een verschuiving naar elektriciteit.

Voor lucht- en scheepvaart is er in deze analyses van uitgegaan dat aandrijving met elektriciteit of waterstof in 2050 nog geen rol speelt. Mochten er voor deze sectoren toch ontwikkelingen in deze richting doorzetten, dan zal het aandeel daarvan in 2050 beperkt zijn.

5.3 Resultaten van de modelanalyses

Een emissievermindering van de broeikasgassen met 80 procent in Nederland is technisch gezien op vele manieren mogelijk. De energievraag en de beschikbaarheid van voorraden en ruimte zijn echter wel cruciaal (zie figuur 5.1). In de figuur is ook nagegaan in hoeverre 90 procent reductie haalbaar is.

Het pakket met beperkte voorraden en ruimte is onvoldoende om een resultaat van 80 procent vermindering te bereiken. Daarentegen biedt een ruim aanbod voldoende mogelijkheden om tot 90 procent reductie te komen. Op de korte termijn, aan het begin van de route, is er uiteraard veel aandacht voor de grote emissiebronnen, zoals de elektriciteitsproductie. Daar zit immers een groot potentieel voor vermindering. Als de emissies van die elektriciteitsproductie grotendeels zouden zijn geëlimineerd, dan

Figuur 5.1

Haalbaarheid van emissiereductie van broeikasgassen met 80 of 90 procent, 2050

80% reductie

Energievraag ten opzichte van referentiebeeld		-30%	-20%	-10%	-0%
Aanbod voorraden en ruimte	Ruim	+	+	+	+
	Redelijk	+	+	?	?
	Beperkt	-	-	-	-

90% reductie

Energievraag ten opzichte van referentiebeeld		-30%	-20%	-10%	-0%
Aanbod voorraden en ruimte	Zeer ruim	+	+	+	?
	Ruim	?	-	-	-
	Ruim	-	-	-	-

- + Haalbaar
- ? Haalbaarheid onzeker
- Onhaalbaar

wordt het relatieve belang van andere bronnen groter. Aan het einde van de route kan het beeld van de broeikasgasemissies en de verdeling ervan over verschillende bronnen er heel anders uitzien. Daarom is het interessant juist de resterende emissies eens op een rijtje te zetten:

- De emissies in de landbouw (door akkerbouw en veehouderijen) kunnen met technische maatregelen niet veel lager komen dan 11 megaton (Mton), tenzij de productie zou afnemen. Er loopt een onderzoek naar een methaanfilter, dat bij open stallen de methaanemissies van melkveestallen verder zou kunnen verminderen, maar de technische en economische haalbaarheid hiervan zijn erg onzeker en daarom hier niet meegenomen. Deze relatief hoge restemissie uit de landbouw beperkt de ruimte voor emissies uit het energiesysteem.
- Transport met vrachtwagens, luchtvaart, scheepvaart, diverse andere voertuigen en waarschijnlijk ook een deel van de personenauto's blijven voor een groot deel afhankelijk van verbrandingsmotoren, en dus van koolstofhoudende brandstoffen.

De restemissie ligt rond de 30 Mton, waarvan ongeveer de helft voor lucht- en scheepvaart. Verdere vermindering kan vervolgens worden gerealiseerd met de inzet van biobrandstof.

- Voor de gebouwde omgeving wordt verondersteld dat in 2050 niet alle CV-installaties zijn vervangen. Als deze op aardgas worden gestookt, ligt de restemissie in de orde van grootte van 3 tot 6 Mton. Verdere vermindering is afhankelijk van het aandeel groen gas.
- Warmteproductie gebeurt momenteel bij veel bedrijven met ketels of warmtekrachtkoppeling-installaties (WKK), veelal op gas. Hoewel in de toekomst voor een deel daarvan wellicht elektriciteit of waterstof wordt ingezet, gaan we ervan uit dat het aandeel gas substantieel blijft. Bij grote gasgestookte installaties is CO₂-afvang een optie. De afvang van CO₂ bij vele relatief kleine installaties is onhaalbaar. Ook de locatie kan ongunstig zijn voor verder transport van de CO₂. Er is aangehouden dat bij maximaal 80 procent van het verstoekte gas afvang van de CO₂-emissie mogelijk is. Afvang heeft bovendien geen 100 procent verminderingrendement. Er blijven restemissies, net als bij de afvang van procesemissies bij grote bedrijven. In totaal bedragen deze 10 tot 20 Mton. Ze kunnen met de inzet van groen gas verder worden verlaagd. In combinatie met de afvang en opslag van CO₂ kunnen bij sommige bedrijven zelfs negatieve emissies worden gerealiseerd. Toepassing van 50 procent groen gas brengt de genoemde emissies bij elkaar rond de nul.
- Er zijn nog restposten, waaronder fluorgassen uit koelsystemen, rioolwaterzuiveringsinstallaties en gasturbines voor het opvangen van pieken in de elektriciteitsvraag, die rond de 2 Mton kunnen uitkomen.

De genoemde posten geven bij gebruik van fossiele brandstoffen een totaal van 45 tot 70 Mton. Met de inzet van 50 procent biobrandstof en biogas wordt dit 25 tot 40 Mton. Dit behoeft geen absoluut minimum te zijn. Toepassing van CO₂-afvang en -opslag bij de productie van biogas of biobrandstof is een optie voor aanzienlijke verdere vermindering. Bij een zeer ruime beschikbaarheid van biomassa en opslagcapaciteit voor CO₂ kunnen door die combinatie in Nederland als geheel zelfs negatieve emissies worden bereikt.

De beschikbaarheid van voorraden en ruimte kan dus cruciaal zijn. Hoe specifiek is die afhankelijkheid voor de vier belangrijke bouwstenen: vermindering van de energievraag, biomassa en CO₂-afvang en de productie van elektriciteit zonder CO₂-emissies in combinatie met elektrificatie? Elk van deze bouwstenen kan op zich een maximale vermindering van broeikasgasemissies van 30 tot 40 procent bewerkstelligen ten opzichte van het referentiebeeld (bij biomassa moet dan een aanbod van 1.000 petajoule (PJ) beschikbaar zijn). Dat is dus niet genoeg om het doel te halen. Zelfs als elk van de bouwstenen zeer ruim wordt ingezet, maar er bij de overige drie slechts beperkte voorraden en/of ruimte beschikbaar zijn, dan nog blijft een emissievermindering met 80 procent buiten bereik.

Er zijn dus combinaties nodig, maar de vraag is welke, en zijn alle genoemde groepen daarbij nodig? De vervolgstap in de analyse is een meer specifieke verkenning van het belang van deze vier hoofdgroepen van technische opties. Dat doen we door zo'n groep van technische opties uit het toekomstbeeld weg te laten en dan de haalbaarheid van de doelstelling te toetsen.

5.3.1 Vermindering van de energievraag

Bij een energievraag die overeenkomt met het referentiebeeld zijn er opties in het systeem van energieaanbod te vinden om tot een 80 procent vermindering te komen. Daarvoor zijn een ruime beschikbaarheid van voorraden en ruimte voor schone technieken wel een voorwaarde (zie figuur 5.1) en wordt de afhankelijkheid van specifieke technieken die nu nog niet marktrijp zijn groot. Ook als de energievraag in 2050 nog 10 procent hoger zou zijn dan in het referentiebeeld, zou het doel haalbaar kunnen zijn, maar worden de genoemde afhankelijkheden nog sterker. Een redelijk niveau van beschikbaarheid van voorraden en ruimte zou absoluut onvoldoende zijn. Als een van de andere bouwstenen als optie zou wegvallen, dan wordt het realiseren van de doelstelling zonder vermindering van de vraag een bijna onmogelijke opgave.

5.3.2 Biomassa

Aangezien van biomassa vele typen brandstoffen en koolstofhoudende producten kunnen worden gemaakt, biedt deze groep van technische opties potentiële emissiereductie voor alle sectoren en bijna alle processen. Niet in alle gevallen zijn er in 2050 alternatieven. Biomassa lijkt dan ook onmisbaar te zijn voor het halen van 80 procent vermindering. Zelfs een vermindering met 70 procent zonder de inzet van biomassa zal nog niet meevallen (zie figuur 5.2). Deze conclusies gelden uiteraard binnen de gekozen uitgangspunten. Als de verschuiving van brandstoffen naar elektriciteit en waterstof nog veel sterker zou doorzetten dan in tabel 5.2 is aangegeven, dan zou een systeem zonder de inzet van biomassa mogelijk zijn. Niets is uiteraard onmogelijk, maar de haalbaarheid daarvan in 2050 is onwaarschijnlijk.

De resultaten bevestigen nog eens het beeld van de hiervoor genoemde restemissies van 45 tot 70 Mton. Om deze emissies verder te verlagen is biomassa nodig. De volgende vraag is hoeveel biomassa er dan nodig is om 80 procent reductie te kunnen halen. Daarvoor is voor diverse varianten gezocht naar combinaties van technieken met zo min mogelijk biomassa. Dan blijkt dat er minimaal een inzet nodig is van ongeveer 200 PJ (zie figuur 5.3). In een zeer optimistische benadering zou de eigen voorraad in Nederland aan biomassa dus toereikend zijn. Daarvoor moet bij de andere bouwstenen alles uit de kast worden gehaald, de energievraag op een zeer laag niveau worden gebracht en ook elektrificatie verregaand worden doorgezet. Het is reëel om ervan uit te gaan dat niet tegelijkertijd aan al deze randvoorwaarden kan worden voldaan, en dat Nederland het voor een belangrijk deel van import van biomassa zal moeten hebben. Figuur 5.3 laat zien hoe belangrijk vermindering van de energievraag is om de afhankelijkheid van biomassa te beperken, waarvan het toekomstige duurzame aanbod nog zo onzeker is.

Figuur 5.2

Haalbaarheid van emissiereductie van broeikasgassen met 70 of 80 procent, zonder de inzet van biomassa, 2050

80% reductie

Energievraag ten opzichte van referentiebeeld		Met verregaande elektrificatie				Met beperkte elektrificatie			
		-30%	-20%	-10%	-0%	-30%	-20%	-10%	-0%
Aanbod voorraden en ruimte	Zeer ruim	—	—	—	—	—	—	—	—
	Ruim	—	—	—	—	—	—	—	—

70% reductie

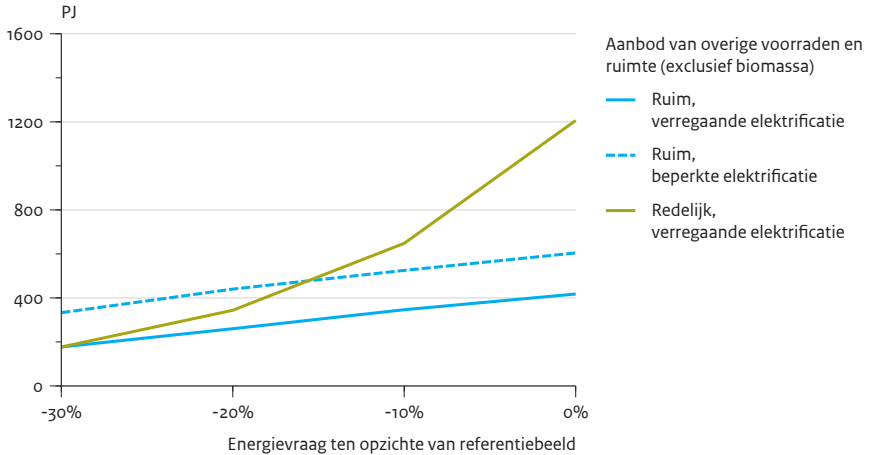
Energievraag ten opzichte van referentiebeeld		Met verregaande elektrificatie				Met beperkte elektrificatie			
		-30%	-20%	-10%	-0%	-30%	-20%	-10%	-0%
Aanbod voorraden en ruimte	Zeer ruim	+	+	?	—	?	—	—	—
	Ruim	+	+	?	—	?	—	—	—

- +** Haalbaar
- ?** Haalbaarheid onzeker
- Onhaalbaar

Bij beperkt aanbod van biomassa wordt deze bij voorkeur ingezet voor de productie van vloeibare brandstoffen voor transport en voor de productie van groen gas. Langs deze weg kunnen vele relatief kleine bronnen worden aangepakt, bronnen zonder technisch alternatief. Waar mogelijk gebeurt die productie in combinatie met de afvang van CO₂, zodat bij die nieuwe processen negatieve emissies kunnen worden gerealiseerd. Voor de elektriciteitsproductie zijn voldoende andere schone productietechnieken beschikbaar. Vooral bij schaarste aan duurzame biomassa betekent het dat bij- en meestook in kolencentrales of specifieke biomassacentrales niet goed past in het systeem.

De inzet van biomassa als grondstof voor de productie van plastics is een zeker zo goede optie als de productie van brandstoffen, maar levert, bij de nu geldende boekhoudregels, slechts een beperkte vermindering van broeikasgasemissies in Nederland. Het overgrote deel van de koolstof komt in de producten, waarvan Nederland een grote exporteur is. Dat wil zeggen dat de emissies vooral in het buitenland optreden, en de vermindering in emissies dus ook. Voor het oplossen van het klimaatprobleem is dit zeker zo effectief.

Figuur 5.3
Vraag naar biomassa, 2050



Voor bedrijven en landen wordt deze aanpak interessanter als ze de credits voor die vermindering op hun conto kunnen schrijven.

5.3.3 CO₂-afvang en -opslag

We hebben al geconstateerd dat de afvang en opslag van CO₂ bij de inzet van biomassa een belangrijke rol speelt bij het realiseren van negatieve emissies. Daarnaast is het natuurlijk een belangrijke techniek om emissies bij andere grote puntbronnen te elimineren. Voorbeelden zijn procesemissies in de staalindustrie, bij grote chemische bedrijven en bij raffinaderijen. Veel bedrijven hebben ook eigen warmteproductie of eigen WKK-installaties, waarbij afvang van CO₂ een belangrijke optie is. Zonder de afvang en opslag van CO₂ lijkt het bijna ondoenlijk om een vermindering met 80 procent te realiseren (zie figuur 5.4). Alleen als alle overige opties maximaal beschikbaar zijn en worden benut, zou het wellicht kunnen lukken.

Voor een emissievermindering met 70 procent zijn er meer mogelijkheden zonder CO₂-opslag, vooral als elektrificatie en de inzet van waterstof verregaand worden doorgezet. Dan kunnen immers de voordelen van schone elektriciteit ten volle worden benut. Vermindering van de energievraag helpt daar zeker bij.

Als de opslag van CO₂ een belangrijk onderdeel van het systeem in 2050 zou zijn, hoeveel moet er dan worden opgeslagen? Daarvoor geven we enkele grootte-orde. Als het referentiebeeld wordt gecombineerd met de huidige technologieën en alle afvangbare CO₂ ook daadwerkelijk wordt geëlimineerd, dan zou er jaarlijks rond de 90

Figuur 5.4

Haalbaarheid van emissiereductie van broeikasgassen met 70 of 80 procent, zonder inzet van CO₂-afvang en -opslag, 2050

80% reductie

Energievraag ten opzichte van referentiebeeld		Met verregaande elektrificatie				Met beperkte elektrificatie			
		-30%	-20%	-10%	-0%	-30%	-20%	-10%	-0%
Aanbod voorraden en ruimte	Zeer ruim	+	?	-	-	?	-	-	-
	Ruim	?	-	-	-	-	-	-	-

70% reductie

Energievraag ten opzichte van referentiebeeld		Met verregaande elektrificatie				Met beperkte elektrificatie			
		-30%	-20%	-10%	-0%	-30%	-20%	-10%	-0%
Aanbod voorraden en ruimte	Zeer ruim	+	+	+	+	+	?	?	-
	Ruim	+	+	+	?	?	?	-	-

- +** Haalbaar
- ?** Haalbaarheid onzeker
- Onhaalbaar

Mton moeten worden opgeslagen. Met verregaande vermindering van de energievraag zou dit ruim 60 Mton per jaar kunnen worden. De helft daarvan ontstaat bij de elektriciteitsproductie, voornamelijk in kolencentrales. In de meeste schone toekomstbeelden is er geen plaats voor kolencentrales door de inzet van windturbines, kerncentrales en zonnepanelen. Dan zou er 25 tot 30 Mton afvangbare CO₂ per jaar resteren, vooral bij de industrie.

Doorgaan met elektriciteitsproductie op basis van fossiele bronnen betekent dat zeer waarschijnlijk export van afgevangen CO₂ nodig is. Daarmee zou ook dit deel van het toekomstige energiesysteem onderdeel worden van een internationaal systeem, in dit geval op Europese schaal met een grote afhankelijkheid van enkele aquifers in het Noorse deel van de Noordzee.

Figuur 5.5
Haalbaarheid van emissiereductie van broeikasgassen met 70 of 80 procent, zonder elektriciteitsproductie uit wind, zon en kernenergie, 2050

80% reductie

Energievraag ten opzichte van referentiebeeld		Met verregaande elektrificatie				Met beperkte elektrificatie			
		-30%	-20%	-10%	-0%	-30%	-20%	-10%	-0%
Aanbod voorraden en ruimte	Zeer ruim	+	+	?	?	+	+	?	-
	Ruim	?	?	-	-	?	?	-	-

70% reductie

Energievraag ten opzichte van referentiebeeld		Met verregaande elektrificatie				Met beperkte elektrificatie			
		-30%	-20%	-10%	-0%	-30%	-20%	-10%	-0%
Aanbod voorraden en ruimte	Zeer ruim	+	+	+	+	+	+	?	?
	Ruim	+	+	+	+	+	+	?	-

- +** Haalbaar
- ?** Haalbaarheid onzeker
- Onhaalbaar

De inzet van biomassa brengt extra (kortcyclische) CO₂ in het systeem, die deels ook kan worden afgevangen en opgeslagen. Op die manier wordt netto CO₂ uit de atmosfeer gehaald, want CO₂ die door de plant of boom voor de groei uit de lucht is gehaald, komt uiteindelijk in een opslagreservoir terecht. Daarin schuilt het potentieel voor negatieve emissies. We geven een indruk van de grootte-orde. Als bij de zeer lage energievraag (30 procent onder dat van het referentiebeeld) 15 procent van de brandstoffen en plastics met biomassa worden geproduceerd met technieken waarbij de CO₂ wordt afgevangen, dan wordt jaarlijks 10 tot 15 Mton CO₂ uit de atmosfeer verwijderd.

Er is ook de mogelijkheid om afgevangen CO₂ in te zetten bij de productie van brandstoffen, zoals methaan of methanol door een reactie van CO₂ met H₂ (waterstof), dat weer met schone elektriciteit kan worden gemaakt (zie paragraaf 4.7). De verwerkbare hoeveelheid CO₂ is bij de productie van methaan relatief beperkt en ligt in de orde van grootte van 0,13 Mton per terawattuur (TWh) elektriciteit. De optie kan ook

interessant zijn vanuit het oogpunt van een betere benutting van hernieuwbare elektriciteit. De energie wordt in feite opgeslagen in de brandstoffen. Bij inzet van die brandstoffen komt de CO₂ alsnog vrij, maar in een goede balans tussen afvang van CO₂ en inzet van brandstoffen verkleint het de afhankelijkheid van elektrificatie.

5.3.4 Elektriciteit van zon, wind of nucleair

In deze variant zijn elektriciteit van zonnepanelen, windmolens, kerncentrales en geothermie samen uitgesloten als mogelijke alternatieven voor kolen- of gascentrales. Het is niet absoluut onmogelijk om dan een emissievermindering van 80 procent te halen, maar die afname afhankelijk van een sterke vermindering van de energievraag en zeer ruime beschikbaarheid van biomassa en opslagcapaciteit voor CO₂ (zie figuur 5.5). De combinatie van biomassa en CO₂-afvang en -opslag speelt daarbij een grote rol om het gewenste resultaat te behalen. Een vermindering met 70 procent lijkt zonder de genoemde vormen van CO₂-vrije elektriciteit mogelijk, als de energievraag voldoende omlaag kan worden gebracht, en met een ruime beschikbaarheid van de genoemde voorraden.

De inzet van de genoemde technieken voor CO₂-vrije elektriciteitsproductie is dus niet absoluut onmisbaar maar wel zeer wenselijk. Het draagt er aan bij dat er een kleiner beroep kan worden gedaan op biomassa (zodat mogelijke effecten van landgebruiksveranderingen geminimaliseerd worden) en de opslag van CO₂ (dat een onzeker potentieel en hoe dan ook een tijdelijk karakter heeft). Hoeveel schone elektriciteit is er dan nodig?

De vraag naar schone elektriciteit kan door elektrificatie flink oplopen. Ook de inzet van waterstof draagt daaraan bij, als deze met elektrolyse wordt geproduceerd. Er moet dan rekening worden gehouden met een jaarlijkse vraag in de orde van grootte van 150 TWh of meer, ook als energiebesparingsmaatregelen worden genomen. Dat kan met aanbodtechnologieën als zonnepanelen, windmolens, kerncentrales, eventueel geothermie of nieuwe vormen van waterkracht, maar daarvoor moet er zeker een ruim potentieel worden aangesproken.

De balans tussen vraag en aanbod van elektriciteit wordt niet alleen bepaald door de jaarlijkse totalen. Zowel in vraag als aanbod zitten pieken en dalen in de tijd. In paragraaf 4.6 zijn de mogelijkheden om hiermee om te gaan al geschetst. Zon en wind leiden door hun grillige aanbodpatroon in bepaalde uren tot meer aanbod dan er vraag is, en dit wordt slechts beperkt gecompenseerd door het aanbod van kerncentrales, die bij voorkeur continu blijven draaien. De flexibiliteit van kerncentrales neemt overigens naar verwachting toe (OECD/NEA 2011). Vraagsturing bij huishoudens, zeker bij het opladen van elektrische auto's, en het benutten van opslagsystemen zoals accu's of oude mijnen voor betere verdeling, dragen bij aan verbetering van de balans, maar dan toch vooral over een korte periode zoals een etmaal. Voor een balans over de seizoenen is een internationale aanpak nodig.

De belangrijkste randvoorwaarde voor een elektriciteitsproductie die vrijwel geheel is gebaseerd op CO₂-vrije technieken is een versterkte uitwisseling met het buitenland. Dan gaat het er vooral om bij pieken in het aanbod te kunnen exporteren en bij pieken in de vraag te importeren. De mogelijkheden daartoe hangen samen met de verschillen in vraag en aanbod in de rest van Europa en de opslagmogelijkheden. Een studie van de European Climate Foundation met een eerste verkenning (ECF 2010) straalt optimisme over de mogelijkheden uit. Inmiddels lopen diverse studies met meer gedetailleerde analyses om tot een beter oordeel te komen over de mogelijkheden en onmogelijkheden.

Van Hout (2011) heeft de effecten van verschillende scenario's voor de stroomproductie op de congestie van Europese netwerken onderzocht aan de hand van het COMPETES-model. De analysesresultaten wijzen op twee belangrijke aspecten. Als de productie van windenergie laag is, dan vindt veel export plaats van landen met waterkracht. Voor Nederland zou dat betekenen dat er stroom uit Noorwegen zou moeten komen. Dat is mogelijk, maar daarvoor is wel uitbreiding van de uitwisselingscapaciteit nodig. Als de productie van windenergie in Nederland en alle landen in Noordwest-Europa juist hoog is, dan is Nederland niet alleen producent, maar ook doorvoerpunt van stroom uit Groot-Brittannië. Versterking van de uitwisseling met Duitsland is daarvoor nodig, maar ook en vooral via Duitsland met de rest van Europa.

Het accent in dergelijke analyses wordt voor Noordwest-Europa gelegd bij windenergie. Ook ECF (2010) gaat daarvan uit. Voor een betere verdeling van het aanbod is een combinatie van wind en zon aantrekkelijker, omdat de patronen niet overlappen. Zo is het aanbod van zonnestroom in de zomer relatief hoog en dat van windenergie juist in de winter. De oriënterende analyses met E-Design voor Nederland laten zien dat een optimale afstemming op de vraag wordt bereikt als er ongeveer twee keer zoveel elektriciteit van wind als van zon wordt aangeboden. Voor Europa is minimaal 20 procent meer wind het beste, waarbij het optimale aandeel wind groter wordt bij grotere bijdragen van gas en kolen (Heide et al. 2010). In een Europees systeem is het waarschijnlijk dat het aandeel zon dan vooral uit Zuid-Europa gaat komen. In welke mate dat gebeurt hangt af van de capaciteit van het Europese netwerk. De inzichten daaromtrent zijn nog niet uitgekristalliseerd. Dergelijke inzichten zijn van invloed op het gewenste niveau van elektriciteit van windmolens en zonnepanelen in Nederland, waarbij ook de Europese prijsvergelijking van belang wordt.

Als het elektriciteitsnetwerk met gelijkstroomkabels wordt uitgebreid naar Noord-Afrika, dan zijn daar extra mogelijkheden om hernieuwbare energie te benutten. Met bijvoorbeeld *Concentrating Solar Power* (CSP, centrales met spiegels) kan een veel beter stuurbaar aanbod van zonnestroom worden toegevoegd. Dat zou netto import van elektriciteit voor Europa betekenen en wellicht ook voor Nederland.

De afhankelijkheid van een Europees netwerk brengt ook een zeker risico met zich mee, omdat bij de realisatie daarvan vele partijen met verschillende belangen verdeeld over alle Europese landen betrokken zijn. Een gedeeltelijk alternatief, waarin Nederland

minder afhankelijk wordt van zo veel andere partijen, is om het (over)aanbod van elektriciteit te benutten door vastlegging van de energie in gas, zoals ook besproken in hoofdstuk 4.

5.3.5 De robuustheid van specifieke technieken voor 2050

In het voorgaande hebben we geconstateerd dat een CO₂-arm energiesysteem niet op één van de beschouwde hoofdgroepen van opties kan worden gebaseerd. Sterker nog, als één van die bouwstenen wordt gemist, dan moeten de andere drie tot het uiterste worden benut om nog een kans te maken het doel te realiseren. Aangezien alle bouwstenen nog onzekerheden kennen, is dat een zeer riskante strategie. Daarom is het robuust om alle vier de bouwstenen in bepaalde mate te ontwikkelen.

Er zijn dus combinaties van hoofdgroepen nodig. Binnen die hoofdgroepen is er nog een scala aan technieken, waarvoor de vraag naar de noodzaak ervan voor 2050 in praktische zin heel relevant is. Het antwoord bepaalt immers het belang van specifieke implementatie- of leertrajecten. Daarom zijn de analyses verder gespecificeerd, waarbij de volgende technieken of groepen van technieken zijn beschouwd:

- Technieken gebaseerd op waterstof, zowel in verkeer en de gebouwde omgeving als voor de warmteproductie in de industrie.
- Warmtepompen voor de gebouwde omgeving en de warmteproductie bij bedrijven, inclusief de tuinbouw.
- Auto's op elektriciteit of op waterstof, inclusief plug-in hybrides.
- Wind op land en wind op zee.
- Kernenergie.
- Zon-PV.
- Biovergassing met afvang en opslag van CO₂ als basis voor de productie van groen gas of vloeibare transportbrandstoffen. De laatste worden wel aangeduid met BTL (Biomass-to-Liquid) of met FT-diesel als het om diesel gaat die met Fischer-Tropsch synthese wordt bereid uit het syngas, het product van de vergassingsstap. We sluiten eventuele alternatieve technieken voor de verwerking van droge biomassa tot producten van biogas, vloeibare biobrandstoffen en bioplastics hierbij zeker niet uit, maar dan wel toegepast in combinatie met CO₂-afvang.
- Geothermie en zonnewarmte voor de gebouwde omgeving en de tuinbouw.
- Afvang en opslag van CO₂ bij de industrie, zowel bij de warmteproductie als voor specifieke procesemissies bij de chemie, de staalindustrie en de raffinaderijen.
- Kolencentrales met meestook van biomassa en afvang en opslag van CO₂.
- Gascentrales of grote WKK-installaties met afvang en opslag van CO₂.
- Decentrale WKK, zoals in de gebouwde omgeving en de tuinbouw zonder afvang van CO₂.

In deze analyses zijn energiebesparingstechnieken niet meegenomen, mede gezien de grote diversiteit aan maatregelen (zie ook hoofdstuk 2). De aanpak bij de analyse is vergelijkbaar met die voor de vier grote bouwstenen. We onderzoeken onmisbaarheid van de genoemde (groepen van) technieken bij vier verschillende varianten voor de

Tabel 5.3

Vergelijking van het belang van de beschikbaarheid van technieken voor een schone economie in 2050

Technologie	Relatief belang	Toelichting
Wind op land	Beperkt	De technologie past prima in het eindbeeld, maar het potentieel voor Nederland is beperkt verondersteld, waardoor het achterwege laten van deze optie met andere technieken kan worden opgevangen.
Wind op zee	Groot	De technologie past prima in het eindbeeld en heeft een groot potentieel. Het achterwege laten van de optie zet veel druk op ofwel import van schone elektriciteit ofwel het sterk vergroten van het aandeel kernenergie.
Zon-PV	Beperkt	De technologie past bij beperkte omvang goed in het eindbeeld. Het heeft echter (meer dan wind) beperkingen bij de aansluiting van vraag en aanbod.
Kernenergie	Groot	De technologie past prima in het eindbeeld en heeft een groot potentieel. Het achterwege laten van de optie kan worden opgevangen met wind- en zonne-energie (aanvullende oplossingen voor vraag-aanbodbalancering zijn dan nodig).
Gascentrales met CCS	Beperkt	Het belang daarvan wordt aanzienlijk groter, als er geen Europees elektriciteitsnetwerk komt met grote uitwisselingscapaciteit. Wel hebben gascentrales een groot belang om flexibele capaciteit te leveren.
Kolencentrales met biomassa-meestook en CCS	Zeer beperkt	Hoewel het een vorm van elektriciteitsproductie is met lage, soms zelfs negatieve emissies, zijn er ook schone alternatieven en op systeemniveau veel varianten waarbij biomassa en CO ₂ -capaciteit beter voor de productie van brandstoffen of groen gas kunnen worden ingezet.
Warmte uit geothermie	Beperkt	De technologie past prima in het eindbeeld, maar het potentieel voor Nederland is beperkt, waardoor het achterwege laten van deze optie met andere technieken kan worden opgevangen.
Zonnewarmte	Beperkt	De technologie past goed in het eindbeeld, maar het potentieel voor Nederland is erg beperkt, omdat er vooral aanbod in de zomer is en voor de winter aanvullende technologie nodig is.
Elektrische warmtepompen	Groot	Deze technologie heeft een belangrijk aandeel in de elektrificatie bij de industrie, tuinbouw en in de gebouwde omgeving, waarmee de benutting van schone elektriciteit wordt versterkt.
Micro-WKK op waterstof	Beperkt	Waterstof kan ook uit elektriciteit worden gemaakt, maar als de waterstof wordt gebruikt om daaruit weer elektriciteit te produceren, dan leidt dit tot veel energieverlies. Het zou alleen van nut zijn als waterstof als opslagmedium fungeert (niet voor de hand liggend) of bij productie uit biomassa.
Micro-WKK op methaangas	Zeer beperkt	Decentrale elektriciteitsopwekking, waarbij aardgas wordt ingezet, levert geen emissievermindering als de centrale elektriciteitsproductie (vrijwel) emissievrij is; lokale toepassingen op biogas kunnen een nuttige aanvulling zijn.

Technologie	Relatief belang	Toelichting
Biomassa-vergassing voor brandstoffen (+CCS)	Zeer groot	Productie van biobrandstoffen (groen gas, transportbiobrandstof) is cruciaal voor bronnen met weinig schone alternatieven. Als pluspunt levert biomassaverwerking met afvang van de bij het proces vrijkomende CO ₂ negatieve emissies.
Elektrische auto's	Groot	Dit type voertuigen kan een belangrijk aandeel hebben in de elektrificatie en daarmee in de rol van schone elektriciteit, mede door flexibiliteit bij het opladen.
Waterstof-auto's	Groot	Deze voertuigen vormen eventueel een alternatief voor elektrische voertuigen, maar hebben wellicht grotere betekenis als aanvullende optie voor wegverkeer over lange afstanden, zoals ook vrachtverkeer.
CCS industriële emissies	Groot	Voor veel processen zijn er geen alternatieven of zijn de alternatieven met grote onzekerheid omgeven.

energievraag. Voor de beschikbaarheid van voorraden en ruimte is op basis van de resultaten van figuur 5.1 uitgegaan van een redelijk aanbod, omdat daar de haalbaarheid van de doelstelling kritisch wordt en dus gevoelig voor het missen van een optie. Dat betekent ook dat deze analyse niet de absolute onmisbaarheid van een techniek aangeeft. Geen enkele techniek is absoluut onmisbaar. Het resultaat toont wel het relatieve belang van een techniek voor het toekomstige systeem ten opzichte van de andere technieken.

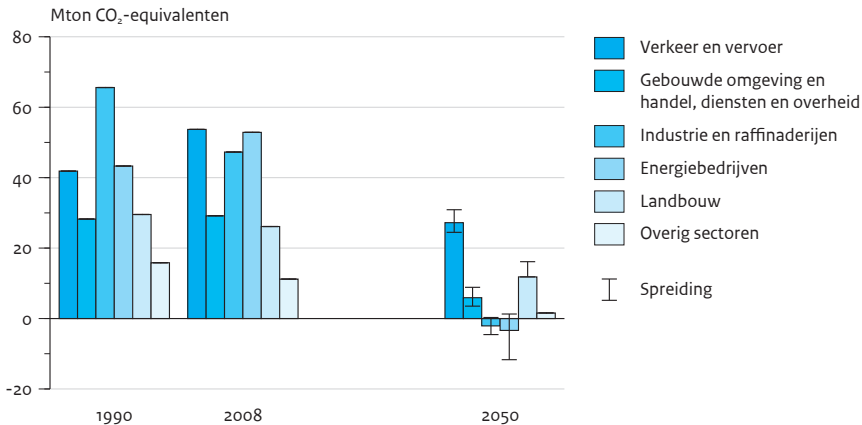
De genoemde technieken zijn één voor één of in combinaties van twee tegelijk buiten beeld gelaten, waarbij de haalbaarheid van een emissievermindering met 80 procent is getoetst. Het komt erop neer dat voor elke (groep van) technieken in totaal 48 varianten zijn getoetst, ook met optimistische en pessimistische inschattingen voor de toekomstige prestaties van de technieken. Op basis van het wel en niet halen van het doel zonder inzet van een bepaalde techniek, is het relatieve belang van de inzet van de technieken in hun onderlinge verhouding bepaald. De resultaten zijn samengevat in tabel 5.3. Hieronder volgt een iets uitgebreidere toelichting.

De elektriciteitsproductie krijgt een centrale plaats in het energiesysteem. Doorgaan met elektriciteitsproductie in kolencentrales zonder afvang van CO₂ maakt het onmogelijk om het einddoel te halen. Ook als alle kolen worden vervangen door gas, wordt het zeer lastig. Er zijn voldoende alternatieven voor het produceren van elektriciteit zonder dat daarbij emissies vrijkomen: windenergie, zonnestroom, kerncentrales, biomassa, geothermie, afvang van CO₂ (met beperkte restemissies) en er zijn nog meer opties, waarvan haalbaarheid en potentiële bijdragen worden verkend. De verscheidenheid in het aanbod van schone technieken is zodanig, dat als een van die technieken zou wegvallen, er genoeg alternatieven overblijven. Bij de gekozen randvoorwaarden voor de uitgevoerde analyses is geen van de technieken dan ook onmisbaar gebleken voor het halen van het einddoel.

Op systeemniveau kwamen wel beperkingen in beeld, die vooral te maken hebben met de afhankelijkheid van het aanbod van duurzame biomassa en de beschikbare CO₂-opslagcapaciteit. Daar is ook vraag naar vanuit andere sectoren, die geen of veel minder zekere alternatieven hebben voor het gebruik van brandstoffen. Dat leidt tot een voorkeur om biomassa en CO₂-afvang zo min mogelijk bij de elektriciteitsproductie in te zetten. Daarnaast wordt de rol van specifieke technieken bepaald door de balans tussen vraag en aanbod van elektriciteit. We zijn nagegaan wat deze afwegingen betekenen voor de rol van specifieke technieken in 2050:

- Kolencentrales met voldoende biomassameestook en afvang van CO₂ kunnen tot negatieve emissie leiden. In die zin vormen ze een prima optie voor schone elektriciteitsproductie. Ze doen echter een groot beroep op biomassa en CO₂-opslagcapaciteit. Als deze niet in ruime mate beschikbaar zijn, dan vormen dergelijke centrales zelfs een belemmering om het doel van 80 procent vermindering op nationale schaal te halen, omdat ze dan andere opties in de weg zitten.
- Gascentrales hebben vooral een belangrijke rol, als een Europees netwerk onvoldoende van de grond komt. De flexibiliteit van gascentrales is dan zeer gewenst om voldoende balans tussen vraag en aanbod te krijgen. Afgezien van een kleine capaciteit van gasturbines voor echte pieken, moet ook bij gascentrales CO₂ worden afgevangen, zij het dat de emissie en dus ook de af te vangen hoeveelheid CO₂ per eenheid geproduceerde elektriciteit lager ligt dan bij kolencentrales.
- Windenergie, zonnestroom en kernenergie zijn drie belangrijke technieken die alle voor CO₂-vrije stroom kunnen zorgen. Elk van deze drie zou nog kunnen worden gemist, maar zonder twee van deze opties wordt het een stuk lastiger om het doel te halen. Daarbij heeft zonnestroom het nadeel dat het aanbod door de seizoensfluctuaties het slechtst aansluit bij de vraag. Kernenergie is hierbij in het voordeel. Juist op het gebied van schone elektriciteit kunnen nieuwe technieken (geothermie, waterstromen) of import (waterkracht, geothermie, zonnecentrales in Noord-Afrika) misschien aanvullende en ook redelijk flexibele opties zijn met voor 2050 zeer waarschijnlijk nog beperkte betekenis.
- Technieken waarbij uit biomassa groen gas of transportbiobrandstof wordt gemaakt en de bij die verwerking vrijkomende CO₂ wordt afgevangen, verenigen enkele wezenlijke elementen van het toekomstig systeem en kunnen daarom een zeer belangrijke rol spelen. Niet alleen worden daarmee negatieve emissies gecreëerd, ook levert het schone brandstoffen voor bronnen met geen of nog onvoldoende beschikbare alternatieven in 2050. Biomassavergassing lijkt daarvoor de meest aangewezen technologie, omdat de CO₂-verwijdering al onderdeel is van het proces, maar wellicht komen er nog alternatieven in beeld. Biomassa en opslagcapaciteit van CO₂ worden op deze manier het efficiëntst benut. Deze combinatieoptie bleek van alle technieken het moeilijkst te missen.
- De rol van schone elektriciteit wordt het beste benut bij verschuiving in de vraag van brandstoffen naar elektriciteit. Elektrische warmtepompen en elektrische voertuigen spelen daarin een grote rol. Het zijn opties die niet alleen in alle gevallen goed in het eindbeeld passen, als ze worden gemist wordt het bereiken van het doel aanzienlijk lastiger.

Figuur 5.6
Emissie van broeikasgassen per sector



- Ook de inzet van waterstof kan worden gecombineerd met schone elektriciteit, omdat waterstof met elektrolyse kan worden geproduceerd. Aangezien waterstof ook uit biomassa en methaan kan worden geproduceerd (met afvang van CO_2) is hier een afweging van belang, waarbij elektrolyse vanuit systeemperspectief de voorkeur verdient, zeker als biomassa schaars wordt. Waterstofauto's kunnen een alternatief zijn voor elektrische auto's, en micro-WKK op waterstof een alternatief voor elektrische warmtepompen. In beide gevallen is de kostendrempel hoger en de energie-efficiency in de keten lager. Als optie voor bijvoorbeeld vrachtwagens of bij de vraag naar hogere temperaturen in de industrie bieden ze belangrijk aanvullend perspectief. We kunnen echter niet concluderen dat een waterstofeconomie een vereiste is om het doel te halen.
- De productie van waterstof biedt wel mogelijkheden om veel meer schone elektriciteit te produceren zonder al te afhankelijk te worden van een Europees elektriciteitsnetwerk. De haalbaarheid van zo'n netwerk vraagt immers investeringen in vele landen en is bepaald geen zekerheid. Als er te weinig opslag- of toepassingsmogelijkheden voor waterstof zijn, dan is omzetting tot methaan of methanol in een reactie met CO_2 een alternatief. Als deze reactie wordt uitgevoerd in combinatie met biomassavergassing, kan dit een aanzienlijke verhoging van de koolstofbenutting uit de biomassa betekenen en dus meer schone brandstof opleveren.
- Decentrale WKK op gas (waaronder micro-WKK in de gebouwde omgeving) is in geen van de doorgerekende varianten een noodzakelijke optie gebleken. Integendeel, als we veronderstellen dat decentrale productie van elektriciteit langs deze weg (ook bij bedrijven) niet met afvang van CO_2 kan worden gecombineerd, dan biedt WKK eerder nadelen dan voordelen als er een vrijwel emissievrije centrale elektriciteitsproductie

- is. Slechts lokaal kan de benutting van biogas met deze techniek een nuttige bijdrage leveren.
- Zonnewarmte of warmte uit geothermie passen prima in een eindbeeld, waarin hernieuwbare bronnen de basis voor het energiesysteem vormen. De vraag naar gas wordt erdoor verminderd. Door het beperkte potentieel heeft het achterwege laten van deze opties echter geen doorslaggevende betekenis.

5.4 Emissievermindering in de verschillende sectoren

Een emissievermindering met 80 procent voor Nederland betekent niet automatisch een vermindering met hetzelfde percentage voor alle sectoren. De mogelijkheden om tot verregaande vermindering te komen verschillen nogal per sector. Er ontstaat zeer waarschijnlijk een geheel andere verdeling van de emissies dan in de huidige situatie. In paragraaf 5.3 is al een schets gegeven van de belangrijke restemissies. Die zijn afhankelijk van de technologiekeuzen. Er is daarom niet één eindbeeld te geven.

We hebben de resultaten van verschillende eindbeelden, zoals berekend met E-Design, elk leidend tot een emissievermindering met 80 procent bijeengebracht (zie figuur 5.6). Die verdeling geeft een indicatie, maar ligt niet vast en er zijn ongetwijfeld varianten te vinden met restemissies per sector buiten de aangegeven ranges.

Belangrijke restemissies zijn er bij het verkeer, waarvoor ook in 2050 rekening moet worden gehouden met een aanzienlijk gebruik van vloeibare brandstoffen, vooral voor vrachtverkeer, luchtvaart en scheepvaart. Vervanging door biobrandstoffen zal door het beperkte aanbod van biomassa waarschijnlijk maar gedeeltelijk mogelijk zijn. In de landbouw blijven er nog emissies van niet-CO₂-broeikasgassen optreden. Emissies bij de tuinbouw zijn grotendeels geëlimineerd. De emissies in de gebouwde omgeving worden naar verwachting aanzienlijk teruggebracht, maar er zal vooral bij de bestaande woningen en gebouwen nog behoefte zijn aan gasverwarming voor ruimte en tapwater. Bij de industrie en de energiebedrijven zijn er door de combinatie van biomassa en opvang en opslag van CO₂ zelfs negatieve emissies mogelijk.

Bij dat laatste past een kanttekening. In een geheel nieuw systeem zijn er ook vele nieuwe processen. Voorbeelden met grote invloed op de emissies zijn verwerkingsprocessen van biomassa tot groen gas of biobrandstof en de productie van waterstof. De toedeling van die processen is van belang voor de verdeling van de emissies over de sectoren, vooral omdat er ook negatieve emissies bij kunnen ontstaan. Die negatieve emissies kunnen bij een groot aandeel biobrandstof of groen gas een grote invloed hebben op het emissieoverzicht. In figuur 5.6 zijn de productie van groen gas en waterstof aan de energiesector toegedeeld en de productie van vloeibare biobrandstoffen aan industrie en raffinaderijen.

De transitie: stappen op de route

6.1 Inleiding

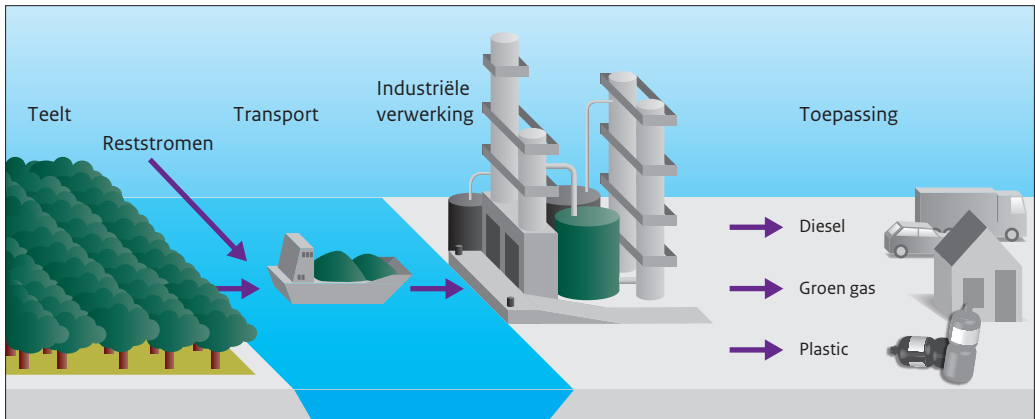
De analyses in het vorige hoofdstuk hebben laten zien hoe groot het belang is van bepaalde onderdelen en specifieke technieken om in 2050 in Nederland een emissiereductie van broeikasgassen met 80 procent te kunnen realiseren. De volgende stap in de backcasting is het uitstippelen van routes om vanuit de bestaande situatie stap voor stap in de richting van een gewenst eindbeeld te komen. Die routes omvatten implementatietrajecten voor meer robuuste onderdelen als inzet van nieuwe typen biomassa voor transportbrandstof en groen gas, toepassing van CO₂-afvang en -opslag en versterking van de rol van schone elektriciteit. Er zijn ook diverse leertrajecten voor specifieke technologieën daarbinnen, waardoor de route als geheel het karakter van een zoektocht met sturing krijgt. Daarbij is het belangrijker om in de komende jaren een aantal stappen in de goede richting te zetten dan te definiëren wat er precies na 2030 of 2040 moet gebeuren, al geeft zo'n stappenplan wel inzicht in de benodigde termijnen voor de transitie.

In dit hoofdstuk schetsen we zes stappenplannen voor belangrijke technologieën. Het gaat daarbij om stappen door maatschappelijke partijen naar realisatie in de praktijk, niet om beleidsstappen. De stappenplannen zijn bedoeld als voorbeelden die duidelijk maken aan welk type concrete acties moet worden gedacht bij de uitwerking van een routekaart. De andere technologieën worden slechts kort belicht. Bij de meer uitgebreide stappenplannen wordt niet alleen aandacht besteed aan de technologie zelf, maar ook aan het deelsysteem dat eromheen moet worden neergezet om de desbetreffende technologie goed te kunnen benutten. Zo zijn er nieuwe, efficiënte

productieketens nodig, aangepaste infrastructuur en niet in de laatste plaats vernieuwde institutionele vormgeving met nieuwe spelers, nieuwe samenwerkingsverbanden en nieuwe spelregels.

Zo'n stappenplan is in wezen een tijdbalk waarop is aangegeven welke acties op welk moment zouden moeten worden ingezet, zodat in 2050 een voldoende grote bijdrage van het desbetreffende deelsysteem kan worden verwacht. De stappenplannen zijn echter geen exacte beschrijvingen met gedetailleerde mijlpalen. Het zijn indicatieve routes die kunnen worden gevolgd, als ervoor wordt gekozen dat implementatie dan wel verkenning van zo'n deelsysteem past in het toekomstige (energie)systeem. Het is uiteindelijk aan stakeholders en overheid samen om een gedetailleerder invulling aan zo'n stappenplan te geven en daarover met elkaar afspraken te maken. Het plan zal ook met enige regelmaat moeten worden bijgesteld op basis van nieuwe inzichten en omstandigheden. In dit hoofdstuk gaan we nog niet na in hoeverre de geïdentificeerde acties in de komende tien jaar door het huidige overheidsbeleid worden uitgelokt. Dat gebeurt wel in hoofdstuk 8. In dat hoofdstuk besteden we in generieke termen ook aandacht aan beleidsinstrumenten die de implementatie van schone technologieën daarna verder kunnen stimuleren.

Figuur 6.1
Bio-energie



6.2 Stappenplan bio-energie

Het vele onderzoek van de laatste decennia, ook in Nederland, heeft geresulteerd in een breed scala aan technologische opties. Sommige verwerkingstechnieken zijn al marktrijp en worden al toegepast. Dit geldt voor verbranding van droge biomassa voor de productie van warmte en elektriciteit, voor vloeibare biobrandstoffen uit plantaardige oliën, zetmeel en suikers, vergisting van natte afvalstromen en van mest tot biogas, en enkele specifieke bioplastics in kleine volumes.

Het grootste potentieel aan duurzame biomassa op de lange termijn zit in stromen met veel lignocellulose, vooral hout en houtachtige stromen, landbouwresiduen (bijvoorbeeld stro) en grassen, zoals olifantsgras. Het leeuwendeel van deze stromen zal moeten worden geïmporteerd. Aquatische biomassa (micro- en macroalgen) is nog in ontwikkeling en kan een groot extra potentieel bieden.

De belangrijkste vraag is naar vloeibare transportbiobrandstoffen en groen gas, eventueel waterstof en bioplastics. De uitdaging is dus tweeledig: de productie van voldoende van de genoemde biomassastromen op duurzame wijze en het operationeel krijgen van de technologie om uit die biomassa de meestgevraagde producten te maken. Als het daarbij lukt een deel van de koolstof uit de productieketen of het gebruik weg te vangen en op te slaan (als CO₂ of wellicht als biochar in de bodem), dan kunnen zelfs negatieve emissies worden gerealiseerd.

Grootschalige biomassavergassing biedt in principe al deze mogelijkheden. Er zijn ook enkele praktijkvoorbeelden, maar vooral met verbranding van het geproduceerde syngas. Omzetting tot andere producten is nog niet marktrijp voor toepassing op grote schaal. Hieraan ten grondslag liggen onder andere problemen met teervorming.

Tabel 6.1

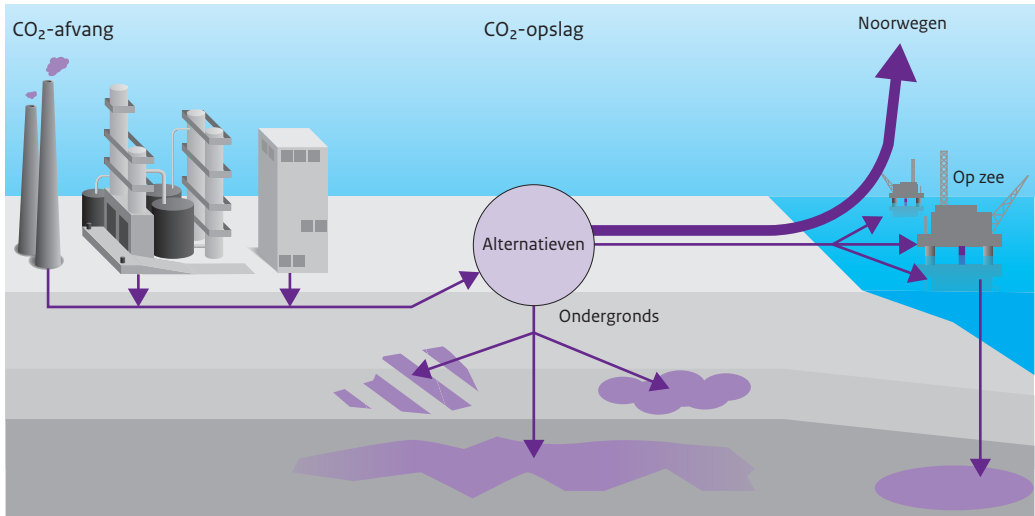
Schets van een mogelijke ontwikkelingsroute voor bio-energie

2010	<ul style="list-style-type: none"> • Benutting van het potentieel voor vergisting • Internationaal geaccepteerde duurzaamheidscriteria voor biomassa en alle typen biobrandstoffen (gas, vloeibaar en vast) • Voortzetten van onderzoek naar optimalisatie van processen voor de productie van nieuwe duurzame biomassa (bijvoorbeeld naar aquatische biomassaproductie in Nederland) en de verwerking ervan tot brandstoffen en chemische producten • Evaluatie van demonstratieprojecten van de afgelopen jaren • Voorbereiding van grootschalige verwerking van lignocellulose tot brandstof met locatiekeuze, technologiekeuze (vergassing?), contracten voor het biomassa-aanbod, vergunningen en de bestemming van af te vangen CO₂
2020	<ul style="list-style-type: none"> • Grootschalige verwerking van lignocellulose • Ondersteuning van projecten voor uitbreiding van de grootschalige, duurzame productie van lignocellulose buiten Nederland (bijvoorbeeld de teelt van grassen op gronden die voor andere landbouwgewassen minder geschikt zijn)
2030	<ul style="list-style-type: none"> • Beoordeling van het potentieel van landbouwgewassen en algen voor energie als basis voor verdere uitrol bio-energie • Uitbouw van productie van bio-energie
2050	

Er is een breed scala aan biochemische routes met meer specifieke producten. Voor de verwerking van residuen van mais en graan tot (tweede generatie) ethanol zijn er diverse demoprojecten, vooral in de Verenigde Staten, maar het stadium van voldoende rendement voor grootschalige productie is ook hiervoor nog niet bereikt. Onderzoek naar productie van andere producten, zoals furanen, bevindt zich in een nog priller stadium.

Geconstateerd kan worden dat er aan ideeën en veelbelovende laboratoriumexperimenten geen gebrek is, maar dat de stap naar de praktijk moeizaam verloopt.

Figuur 6.2
CO₂-afvang en -opslag



6.3 Stappenplan CO₂-afvang en -opslag

Afvang van CO₂ uit CO₂-rijke gasstromen vindt in Nederland bij enkele bedrijven plaats als onderdeel van het proces en niet als emissiebeperkende maatregel. Dit gebeurt vooral met wasvloeistoffen (amines). Die technologie is dus beschikbaar, maar voor omvangrijke en meer verdunde afgasstromen uit schoorstenen is de technologie nog niet toegepast. Er zijn ook nadelen: niet alleen zijn de kosten relatief hoog, maar het kost ook extra energie en er ontstaat afval in de vorm van afgewerkte amines. Er zijn andere mogelijkheden – zoals toepassing van vaste sorbents – maar deze technieken zijn nog niet marktrijp.

Omdat de afvang vanuit geconcentreerde stromen veel goedkoper is en hogere afvangrendementen mogelijk maakt, wordt ook op procesniveau gekeken naar aanpassingen, zoals verbranding met zuivere zuurstof in plaats van lucht (*oxyfuel*) of verwijdering van de CO₂ uit stookgassen die ontstaan bij de vergassing van steenkool (*pre-combustion*). Toepassing van deze technieken is alleen mogelijk bij nieuwe installaties.

Er zijn opslagmogelijkheden op land, maar vanwege de maatschappelijke weerstand heeft de overheid ervoor gekozen om deze vooralsnog niet in te zetten. Op het Nederlandse deel van de Noordzee zal opslagcapaciteit in lege gasvelden beschikbaar komen. Het goedkoopst is het als de bestaande platforms daarbij worden ingezet. Deze worden normaal gesproken binnen enkele jaren na stopzetting van de gaswinning verwijderd. Als deze behouden moeten blijven voor CO₂-opslag, dan zijn er

Tabel 6.2

Schets van een mogelijke ontwikkelingsroute voor CO₂-afvang en -opslag

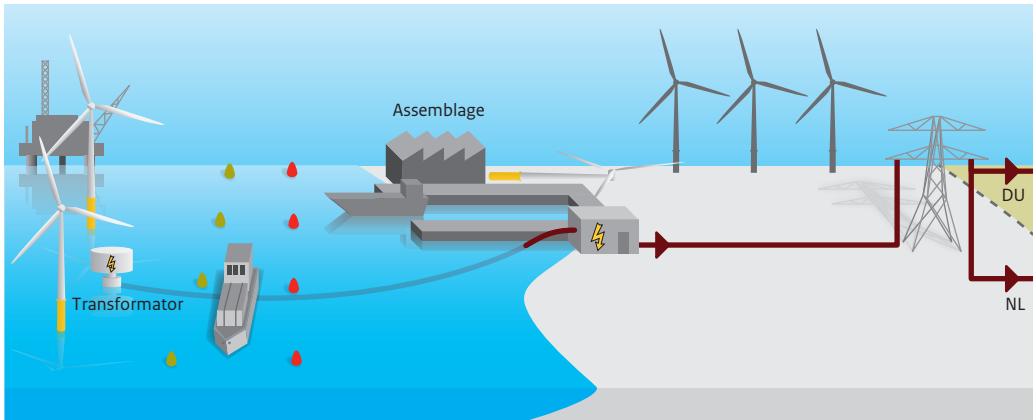
2010	<ul style="list-style-type: none"> • Praktijkproeven van CO₂-opslag (zo mogelijk met al beschikbare CO₂-stromen uit de procesindustrie) • Locatiekeuze voor (eerste fase van) opslag; afweging lege Nederlandse gasvelden op zee of Noorse aquifers • Contracteringsfase: langjarige contracten tussen bedrijven over levering, afname, transport en opslag als basis voor investeringen • Nieuwe grote gasgestookte installaties <i>capture ready</i> maken (geschikt voor toevoegen van afvangtechnieken) • Demonstratie van bestaande afvangtechnologie op grote schaal bij e-centrales • Verbetering van de afvangtechnologie (verlagen kosten en energieverbruik) met praktijkproeven
2020	<ul style="list-style-type: none"> • Eerste fase van realisatie van infrastructuur en opvanginstallaties en inrichting van logistiek beheer • Controlemetingen monitoring van benutte velden om zekerheid te verkrijgen over de betrouwbaarheid van de opslag • Onderzoek naar benutting van de CO₂ als grondstof voor productie van koolwaterstoffen • Implementatie verbeterde afvangtechnologie
2030	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilisatiefase afvang en opslag in de praktijk • Demonstratieprojecten voor toepassing CO₂ als grondstof • Voorbereiding volgende transitiefase vanwege de eindigheid van opslagcapaciteit
2050	

beheerkosten. Daarom is het zaak de velden na stopzetting van de gaswinning ook snel weer te gaan benutten. Ook de logistiek van aanvoer, transport en opslag vormt een uitdaging, omdat het om vele kleine velden gaat die alle op andere momenten beschikbaar komen en na verschillende perioden weer vol zijn.

Er is ook de optie om CO₂ op te slaan in een groot aquifer in het Noorse deel van de Noordzee. In dat geval volstaat één grote pijpleiding. Dat maakt de logistiek in ieder geval eenvoudiger. Andere landen kunnen daar ook gebruik van maken. Dan zullen afspraken moeten worden gemaakt over de verdeling van kosten die met de activiteiten gepaard gaan.

Ten slotte moet er ook een infrastructuur komen om de CO₂ van de bedrijven bij de centrale pijpleidingen te brengen. Clustering van bedrijven met flinke emissies helpt daarbij.

Figuur 6.3
Elektriciteit uit wind



6.4 Stappenplan elektriciteit uit wind

Windmolenparken vergen ruimte, en de aanleg ervan concurreert met ander ruimtegebruik. Op land vormt visuele verstoring van het landschap de belangrijkste ruimtelijke bottleneck. Qua kosten kan wind op land rond 2020 mogelijk concurreren met niet-hernieuwbare elektriciteitsproductie, op windrijke kustlocaties nog iets eerder, maar dit hangt onder andere af van de prijzen van gas en kolen. De verdere toename van wind op land wordt na dit moment vooral beperkt door ruimtelijk beleid en het geringe maatschappelijk draagvlak.

Ook wind op zee concurreert met ander ruimtegebruik. Daarbij gaat het om scheepvaart, visserij, natuurgebieden, platforms voor olie- en gaswinning, militair oefenterrein, kabels- en pijpleidingen, zandwinning, en algemene uitsluitingen (12-mijlszone). Tussen windparken moet afstand worden bewaard, omdat anders de windkracht te sterk afneemt (windschaduw). De ruimtelijke functies kunnen deels worden gecombineerd. Om het potentieel van wind op zee maximaal te benutten en de kosten te beperken, is een zorgvuldige ruimtelijke afweging van functies nodig. De kosten voor wind op zee lopen op naarmate de zeebodem dieper en de afstand tot de kust groter is. Veel ondiepe locaties dicht bij de kust worden al gebruikt voor andere functies. Om kosten voor wind op zee te beperken, kan het huidige ruimtegebruik worden heroverwogen, zoals algemene uitsluitingen binnen de 12-mijlszone en militair oefenterrein. Visserij kan plaatsvinden tussen windparken.

De windmolens moeten worden aangesloten op het elektriciteitsnet. Voor wind op zee kunnen kabels worden aangelegd naar het Nederlandse vasteland. Dit is een logische keuze voor windparken dicht bij de kust. Als veel windparken verder uit de kust worden

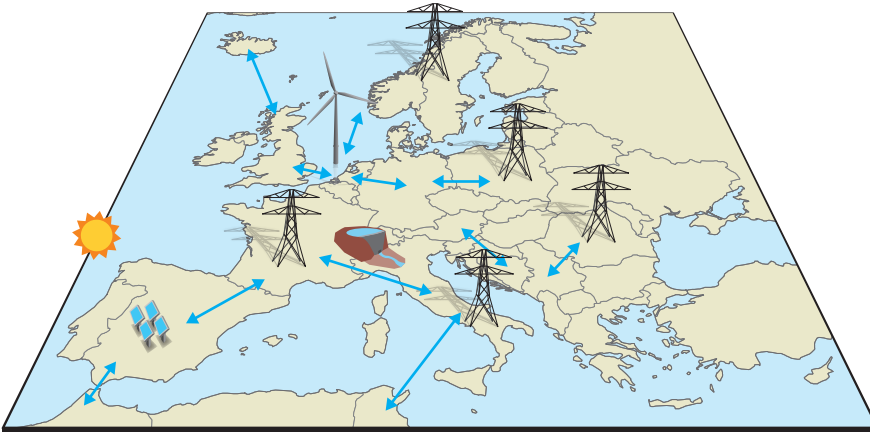
Tabel 6.3

Schets van een mogelijke ontwikkelingsroute voor elektriciteit uit wind

2010	<ul style="list-style-type: none"> • Verder realiseren van potentieel wind op land • Geleidelijke uitrol van wind op zee met continuïteit daarin • Centrale verzameling van basisgegevens (rol overheid) • Ruimtelijke ordening op zee met internationale afstemming; concessies dicht op de kust kunnen als eerste worden uitgegeven • Regelen netbeheer op zee, ook met internationale afstemming • Voorbereiden inpassing van groot aandeel windenergie in het elektriciteitsnetwerk met de inrichting van aansluitpunten op zee • Continuering van R&D
2020	<ul style="list-style-type: none"> • Vergroten van de interconnectiecapaciteit, wellicht internationaal gelijkstroomnetwerk (zie ook paragraaf 6.5 – internationaal elektriciteitsnetwerk) • Voortgaande uitrol wind op zee • Inrichting van netwerk op zee in samenspel met andere Noordzeelanden
2030	<ul style="list-style-type: none"> • Verdere uitrol wind op zee tot het grotendeels benutten van het potentieel
2050	

aangelegd, is het goedkoper om de aansluiting te coördineren en een netwerk op zee aan te leggen. Dit vergt samenwerking van de netbeheerders van de landen rond de Noordzee. De elektriciteitsproductie met wind is aanbodgedreven, en variabel in de tijd. Als windenergie een groot aandeel krijgt, kan dit in het huidige elektriciteitssysteem tot problemen leiden met de balans tussen vraag naar en aanbod van elektriciteit. Het beter voorspellen van de productie van windenergie en het sneller daadwerkelijk leveren van elektriciteit na het sluiten van de markt kunnen bijdragen aan het verminderen van deze problemen. Daarnaast kan de onbalans worden ondervangen door uitbreiding van het elektriciteitsnet en versterking van de verbindingen met het buitenland, opslag van elektriciteit, sturing van de vraag naar elektriciteit (*smart-grid*) en voldoende back-upcapaciteit van bijvoorbeeld gascentrales. Ook kan door aanpassing van het windturbineontwerp de zogenoemde capaciteitsfactor worden vergroot, waardoor de fluctuatie in de productie wordt verkleind. Gezien de grootte van de windturbines is veel ruimte in havens nodig voor onder andere assemblage van onderdelen, en zijn grote schepen nodig voor het transport en plaatsen van de windturbines.

Figuur 6.4
Europees elektriciteitsnetwerk



6.5 Stappenplan internationaal elektriciteitsnetwerk

Voor een betrouwbare elektriciteitsvoorziening moeten vraag en aanbod op elkaar worden afgestemd. De vraag varieert, maar is wel redelijk voorspelbaar gezien de planning van productieprocessen en leefritmes van mensen. Traditioneel werd dan ook het aanbod aangepast aan de vraag. De stroomproductie van zon en wind, maar ook die van kerncentrales is minder gemakkelijk aan te passen aan de vraag. Versterking van de uitwisselingscapaciteit met omliggende landen en tussen alle Europese landen is een belangrijke oplossingsrichting, vooral omdat het Nederlandse elektriciteitssysteem sterk is geïntegreerd in de Centraal- en West-Europese elektriciteitsmarkt. De mogelijkheden voor balanceren worden daardoor sterk bepaald door ontwikkelingen in omliggende landen. Op grotere schaal is zowel het aanbod als de vraag gelijkmatiger en kan ook opslagcapaciteit (*pumped storage*) in bergstreken beter worden benut (zie ook paragraaf 3.9). Dit verkleint de noodzaak voor het compenseren van onbalans binnen Nederland (die overigens in slimme netten kan worden verkleind; zie 6.8.4).

De verwachting is dat de doelstelling voor hernieuwbare energie voor 2020 zonder problemen voor de stabiliteit van het elektriciteitsnetwerk kan worden gerealiseerd: de flexibiliteit van het elektriciteitspark en de grensoverschrijdende netwerkcapaciteit (interconnectie) zijn daarvoor voldoende groot. Als we verder kijken, naar 2030, zijn er mogelijke knelpunten. Bij een lage productie van windenergie wordt Nederland sterker afhankelijk van waterkracht uit Scandinavië (eventueel met pompvermogen), en is interconnectiecapaciteit van het bestaande netwerk onvoldoende. Naast Nederland zijn ook Duitsland, Denemarken en Groot-Brittannië om deze reden van plan de netwerkverbindingen met Scandinavië te versterken. Als Nederland en andere landen in Noordwest-Europa veel windenergie produceren, biedt export naar Centraal- en Oost-Europa mogelijkheden voor balancering. Nederland krijgt daarmee een belangrijke

Tabel 6.4

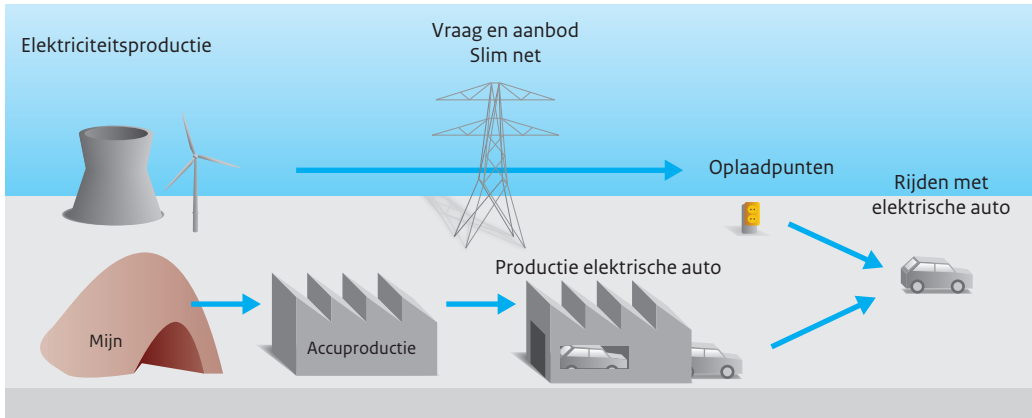
Schets van een mogelijke ontwikkelingsroute voor het internationale elektriciteitsnetwerk

2010	<ul style="list-style-type: none"> • Verdere uitbreiding van de interconnectiecapaciteit met omliggende landen, met als belangrijke aandachtspunten het kunnen benutten van waterkracht uit Scandinavië en de afzet van windenergie van de Noordzee in Centraal- en Oost-Europa • Opzetten van plan en samenwerking voor aansluiting van wind op zee met regionale samenwerking • Versterking van de interconnectiecapaciteit in heel Europa, met vanuit Nederland ondersteuning van ENTSOE-E bij de coördinatie van de uitwerking van een Europees netwerk uit het perspectief van een CO₂-arm elektriciteitssysteem in 2050 (het <i>Ten Year Network Development Plan</i> van ENTSOE-E is hiervoor een blauwdruk) • Aanpassing van regulering en kostenverdeling voor netwerkontwikkeling • Vergroting van de flexibiliteit van het bestaande elektriciteitsproductiesysteem
2020	<ul style="list-style-type: none"> • Versterking van de interconnectiecapaciteit in heel Europa met de afweging over de geschikte rol van gelijkstroomtransmissie over lange afstanden met blijvende betrokkenheid van de ENTSOE-E • Versterking van verbindingen met locaties met opslagcapaciteit • Er moet rekening worden gehouden met de plannen van andere landen (Duitsland, Denemarken, Groot-Brittannië) voor uitbreiding van de netwerkverbindingen met Scandinavië • Verdere harmonisering van wet- en regelgeving met omliggende landen • Proefprojecten voor innovatieve opslagsystemen in Nederland (gecomprimeerde lucht, accu's, of als gas via het gasnetwerk)
2030	<ul style="list-style-type: none"> • Versterking van de interconnectiecapaciteit in heel Europa, mogelijk met gelijkstroomnetten voor benutting van zonnestroom in Noord-Afrika • Verdere koppeling en harmonisatie van netbeheer, markten en regulering in Europa • Toepassing van innovatieve opslagsystemen (bij succesvolle ontwikkeling)
2050	

doorvoerfunctie. Hiervoor is niet alleen uitbreiding van de uitwisselingscapaciteit met Duitsland nodig. Ook verbindingen binnen en tussen landen in Centraal- en Oost-Europa zijn van groot belang. Op de lange termijn kan een verbinding van Europa met Noord-Afrika het aandeel schone zonne-energie vergroten door elektriciteit uit flexibel inzetbare *Concentrating Solar Power*-installaties af te nemen.

Op Europees niveau vinden vele onderzoeken plaats naar de rol van elektriciteitsnetwerken in het toekomstige energiesysteem, mede ter voorbereiding van Roadmaps. Het feit dat een specifieke verbinding tussen twee buurlanden in sommige gevallen weinig direct belang heeft voor die twee landen, maakt dat de realisatie van een Europees netwerk geen eenvoudige klus zal zijn. Daarbij speelt ook de afweging tussen gelijkstroomkabels met minder verliezen over lange afstand of wisselstroomverbindingen die als directe koppeling tussen twee landen goedkoper zijn. Waarschijnlijk zal er voor beide opties plaats zijn. De nationale Transmission System Operators (Tennet in Nederland) hebben in opdracht van de Europese Commissie een samenwerkingsverband (ENTSOE-E) opgericht voor de coördinatie van de uitbreiding van het Europese elektriciteitsnetwerk.

Figuur 6.5
Elektrisch vervoer



6.6 Stappenplan elektrisch rijden

In dit deelsysteem staat de accu centraal. In combinatie met een elektromotor is toepassing in vele voertuigen mogelijk. Scooters, stadsauto's, gezinsauto's, bestelwagens en andere transportmiddelen kunnen als elektrische voertuigen worden uitgerust. Dat geldt ook voor fietsen, al betekent dat juist extra vraag naar energie. Het voordeel van elektrische fietsen kan schuilen in de mogelijkheid dat deze een alternatief kunnen zijn voor de auto voor bijvoorbeeld woon-werkverkeer tot 20 kilometer. De energie voor onderweg wordt opgeslagen in de accu, maar de energiedichtheid daarin is laag ten opzichte van brandstoffen als diesel of benzine. Dit is een punt voor verder onderzoek, maar er moet ook in de toekomst rekening worden gehouden met een relatief lage energiedichtheid en dus met accupakketten van honderden kilo's (in personenauto's). Mede gezien het hoge prijskaartje van de accu schuilt daarin een praktische beperking voor de actieradius (PBL 2009). Verlaging van de prijs is mogelijk door verdere verbeteringen aan de accu (waarbij momenteel tal van verschillende typen worden onderzocht), maar vooral ook door optimalisatie en schaalvergroting bij de productie van de accupakketten. Dat betekent grotere productieseries van elektrische auto's.

Voertuigen hebben het voordeel dat ze een groot deel van de dag niet worden gebruikt en juist dan kunnen worden opgeladen. Dat biedt flexibiliteit om het opladen zodanig te sturen dat wordt ingespeeld op het mogelijk minder stuurbare aanbod in de elektriciteitsproductie. De mogelijkheid om thuis op te laden kan een gemak zijn, maar dat betekent wel dat iedere eigenaar ook de garantie van een parkeerplaats met oplaadpunt bij huis moet krijgen. Daarnaast zijn er consequenties voor het elektriciteitsnetwerk (zie paragraaf 6.5).

Tabel 6.5

Schets van een mogelijke ontwikkelingsroute voor elektrisch rijden

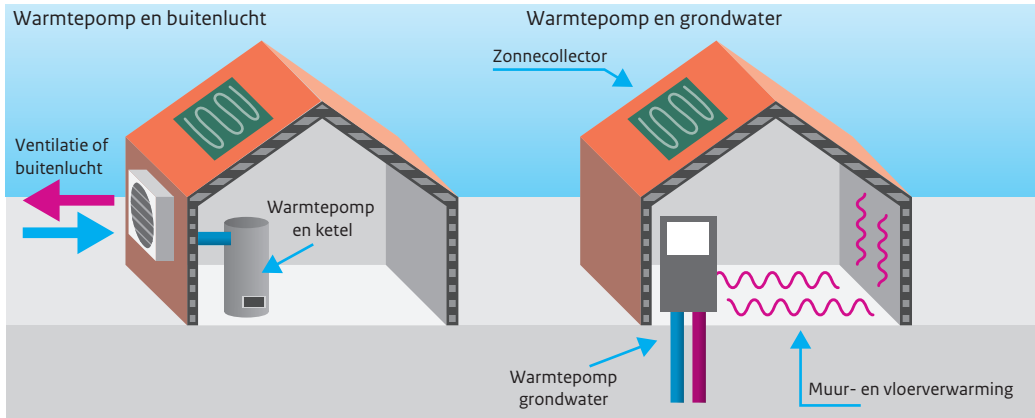
2010	<ul style="list-style-type: none"> • Onderzoek naar verbetering van de accu, vooral de mogelijkheden voor snelladen en het verhogen van de energiedichtheid • Kostenverlaging door <i>learning by doing</i> door geleidelijke toename van de toepassing in auto's in de praktijk • Uitbreiding productiecapaciteit voor accu's en de benodigde grondstoffen • Beperkte uitbreiding van het netwerk van snellaadstations • Verkenning van de mogelijkheden voor toekomstige oplaadpunten, ook voor autobezitters zonder eigen parkeerplaats • Stimulering gebruik (elektrische) fietsen voor korte afstanden.
2020	<ul style="list-style-type: none"> • Verdere vergroting van het aandeel elektrische auto's in nieuw verkochte voertuigen • Inrichting van een uitgebreid systeem met oplaadpunten, met thuislaadpunten en snellaadstations
2030	<ul style="list-style-type: none"> • Uitbouw van het systeem tot volledige benutting van het potentieel (het gewenste aandeel elektrische auto's in 2050 moet al tussen 2035 en 2040 worden gehaald in de verkoop van nieuwe auto's)
2050	

Laden kost veel tijd. Vooral onderweg kan dat een groot nadeel zijn. Faciliteiten voor snelladen kunnen een oplossing bieden, maar aandachtspunt daarbij is dat dit ten koste kan gaan van de levensduur van de accu. Hiervoor is meer ervaring nodig met accu's in de praktijk (en niet alleen binnen gecontroleerd onderzoek), ook om het vertrouwen van de consument te winnen. Andere oplossingen gaan in de richting van gerobotiseerde wisselstations voor accupakketten, of accu's waarvan uitgewerkt vloeibaar elektrolyt kan worden afgetapt en nieuw elektrolyt kan worden getankt, of van plug-in hybrides waarbij ook op brandstof kan worden gereden – ofwel door naast de elektromotor een verbrandingsmotor te plaatsen, ofwel door met de brandstof elektriciteit te produceren. Dat laatste kan in de toekomst wellicht ook met waterstof, waarbij alsnog een nulemissie kan worden bereikt.

Het ligt het meest voor de hand om te beginnen met het op de markt brengen van plug-in hybrides met een beperkt elektrisch bereik voor autobezitters met een eigen parkeerplaats (voor het opladen). Ook kunnen wellicht nichemarkten voor bedrijfswagens met specifieke functies, taxi's of zeer kleine, lichte elektrische voertuigen met een beperkte actieradius worden benut.

De ontwikkeling is niet afhankelijk van toepassing in Nederland, maar het belang daarvan is vooral om ervaring op te doen (bijvoorbeeld in specifieke regio's) met zaken als geautomatiseerde sturing op het opladen, inrichting van aangepaste netwerken en onderhoud van elektrische voertuigen.

Figuur 6.6
Isolatie en warmtepompen



6.7 Stappenplanbestaande woningen richting klimaatneutraal

Naar verwachting zal circa 75 procent van de woningvoorraad in 2050 bestaan uit woningen die er nu al staan, en die gemiddeld een tamelijk hoog energiegebruik hebben. Om de klimaatdoelstelling in 2050 te kunnen halen, zullen de CO₂-emissies van deze woningen verregaand omlaag moeten worden gebracht. Technisch gezien is dit mogelijk, hoewel de prijs en prestatie van een aantal technieken nog kunnen verbeteren. De warmtevraag van de woning kan worden verlaagd door de gebouwschil goed te isoleren en door zogenoemde balansventilatie met warmteterugwinning toe te passen. Met balansventilatie moet nog wel meer ervaring worden opgedaan, omdat de huidige systemen vaak nog tot problemen leiden met de binnenluchtkwaliteit (RIVM 2011). De restvraag naar warmte (voor verwarming en warm tapwater) kan met andere, CO₂-armere technieken worden ingevuld dan de traditionele cv-installatie. De belangrijkste technieken – de elektrische warmtepomp en zonnewarmte – zijn in paragraaf 4.3 beschreven. Warmtepompen worden in de woningbouw nog niet op grote schaal toegepast, en verwacht wordt dat de prijs van dergelijke systemen door leer- en schaafeffecten in de toekomst nog met 20 tot 40 procent kan dalen (ECN 2011c). Zonnewarmte kan op dit moment alleen in de zomer een bijdrage leveren. Mogelijk kan dit in de toekomst veranderen, als er systemen voor seizoensopslag beschikbaar komen. Hiervoor is nog onderzoek nodig. Het lijkt raadzaam om met de nog niet uitontwikkelde technieken eerst meer ervaring op te doen in de nieuwbouw alvorens ze toe te passen in bestaande woningen. Ze kunnen in de nieuwbouw vaak beter en goedkoper worden geïntegreerd in het totale ontwerp van de woning.

Tabel 6.6

Schets van een mogelijke ontwikkelingsroute voor klimaatneutrale woningen

2010	<ul style="list-style-type: none"> • Warmtepompen en balansventilatie eerst toepassen in nieuwbouw voor opbouw ervaring bij aannemers, installateurs, eigenaren en verhuurders • Isolatieprogramma's starten voor het benutten van renovatiemomenten en het realiseren van een gemiddeld isolatietempo van circa 150.000 woningen per jaar • Implementeren van slimme (financierings)constructies voor woningverbetering • Actief benaderen van particuliere woningeigenaren met kennisoverdracht • Voortzetten onderzoek naar seizoensopslag van zonnewarmte
2020	<ul style="list-style-type: none"> • Isolatieprogramma's uitbreiden met warmtepompen, balansventilatie en mogelijk opslagtechnieken
2030	<ul style="list-style-type: none"> • Voortzetten van programma's om bestaande woningen klimaatneutraal te maken
2050	

Hoewel de meeste maatregelen zich tijdens de levensduur van de installatie en/of woning kunnen terugverdienen, is het huidige tempo van energiebesparing en overschakeling op CO₂-arme warmteopwekking veel lager dan gewenst. De belangrijkste barrières zijn dat vaak de wil, de kennis en/of de financiële middelen voor de benodigde investeringen ontbreken (CE 2010). Deze barrières spelen vooral een rol bij particuliere woningeigenaren en particuliere verhuurders. Bij woningcorporaties zijn de barrières naar verwachting kleiner, ook omdat renovaties grootschalig en dus goedkoper kunnen worden aangepakt.

Er zijn twee redenen om het tempo van woningverbetering op korte termijn flink omhoog te schroeven. Ten eerste zullen ingrijpende renovaties tijdens de levensduur van een woning weinig frequent plaatsvinden. Door te wachten bestaat het risico dat dergelijke 'natuurlijke' momenten de komende jaren onvoldoende worden benut. Ten tweede moeten tot 2050 in totaal 6 miljoen woningen worden geïsoleerd. Als daar nu mee wordt begonnen, zijn dat er gemiddeld 150.000 per jaar. Een dergelijk aantal zal waarschijnlijk al een grote inspanning vragen van de aannemerij en installatiebranche. Hoe langer wordt gewacht, des te groter is het risico dat de capaciteit van de bouwsector een knelpunt wordt.

Er zouden dus grootschalige isolatieprogramma's moeten worden gestart. Om de gesignaleerde barrières te overwinnen, kunnen kapitaalkrachtige, deskundige partijen – bijvoorbeeld de energie(diensten)leverancier – de energiegerelateerde maatregelen financieren en laten uitvoeren. De woningeigenaar betaalt dit over een lange periode (bijvoorbeeld tien tot twintig jaar) terug. Voordeel is dat woningeigenaren minder organisatorische rompslomp hebben en geen groot bedrag ineens hoeven te betalen. Het tekort aan kennis over de mogelijkheden en voordelen van woningverbetering kan mogelijk worden verkleind door woningeigenaren actief te benaderen met voorlichtingscampagnes. Dat vereist een grotere inspanning dan het lanceren van een website en/of het uitzenden van tv-spotjes.

6.8 Korte beschrijving van belangrijke stappen voor andere deelsystemen

In de vorige paragrafen hebben we stappenplannen voor enkele belangrijke deelsystemen geschetst ter illustratie van een mogelijke invulling van een routekaart. Voor enkele andere deelsystemen geven we kort enkele belangrijke overwegingen daarvoor.

6.8.1 Zonnestroom (PV)

Elektriciteit op basis van fotovoltaïsche (PV) omzetting van zonlicht heeft de laatste jaren een sterke ontwikkeling doorgemaakt. De toepassing is op mondiale schaal sterk toegenomen en de prijs voor een PV-systeem is aanzienlijk afgenomen. Ook in Nederland is er sprake van een toename. Overigens moet bij een zo sterk groeiende markt rekening worden gehouden met fluctuaties in de prijs, omdat er geen stabiele balans is tussen vraag en aanbod.

De mogelijkheid voor kleinschalige toepassing van de techniek (door de modulariteit) maakt deze ook geschikt voor toepassing op daken van woningen en gebouwen, waardoor burgers en bedrijven een mogelijkheid hebben om zelf bij te dragen aan de productie van schone elektriciteit. Ondanks de recente prijsverlaging zijn de productiekosten van elektriciteit met zonnepanelen met 20-30 eurocent per kilowattuur nog steeds relatief hoog (in Nederland ook hoger dan in Zuid-Europese landen als gevolg van de lagere zoninstraling). Vanwege het hoge elektriciteitsstarief voor kleingebruikers kan zonnestroom voor een consument echter toch met de terugleververgoeding voor kleinschalige productie voordelig uitpakken, al blijft er wel een investeringsdrempel.

De leercurve is nog lang niet op het eindpunt gekomen. De verwachting is dat bij verdere toepassing de prijs nog aanzienlijk kan dalen. Dat zal echter tijd vragen. Bij een snelle stijging van de toepassing kunnen de totale kosten relatief hoog worden, omdat dan in mindere mate van deze verwachte prijsdaling zal worden geprofiteerd. Ter indicatie is een snelle (lineair verlopende) toename van de zonnestroomproductie tot 20 terawattuur in 2020 vergeleken met een meer geleidelijke toename tot datzelfde niveau in 2050, onder de veronderstelling dat de toepassing in Nederland niet van invloed is op de mondiale leercurve. Een snelle toename zou dan over de gehele periode 14 miljard euro duurder zijn dan een geleidelijke toename. Dat pleit voor geleidelijkheid. Daarbij zijn in Nederland voorlopig nog geen problemen met inpassing in het net te verwachten. Overigens komen er in Duitsland (met een totale bijdrage van zonnestroom aan de elektriciteitsproductie van minder dan 2 procent) op zonnige zomermiddagen al uren voor dat met zonnestroom in de gehele Duitse (op dat moment lage) elektriciteitsvraag kan worden voorzien en bijvoorbeeld windmolens kunnen worden stilgezet (Wuppertal Instituut 2011).

Waarom dan niet wachten met verdere toepassing tot later? Afgezien van het feit dat als alle landen dit zouden doen de verdere ontwikkeling zou worden gefrustreerd, zijn er enkele argumenten om de toepassing verder uit te breiden. In de eerste plaats betreft een deel van het leerproces de inpassing van het systeem in gebouwen en woningen, de aanpassing van de elektriciteitsnetwerken en de installatie en het onderhoud van PV-systemen. Het is verstandig de opgedane ervaring in Nederland niet verloren te laten gaan, maar deze verder uit te bouwen. In de tweede plaats zou aan burgers en bedrijven een alternatief worden ontnomen dat bij uitstek als duurzaam en aantrekkelijk wordt beschouwd. In de derde plaats kan een thuismarkt Nederlandse bedrijven altijd een steuntje in de rug geven, ook al zijn deze sterk op export gericht.

6.8.2 Kernenergie

Met de hoge investeringskosten en lage exploitatiekosten is kernenergie goed te vergelijken met grootschalige wind- of zonne-energieprojecten. Kernenergie wordt evenwel niet maatschappelijk gesteund zoals dat wel het geval is met hernieuwbare energievormen. De bouwkosten van een nieuwe centrale (4 tot 5 miljard euro) zijn in vergelijking met kolen- of gascentrales erg hoog. Daardoor zijn de terugverdientijden in het gunstige geval lang, en bestaat zelfs het risico dat de centrale niet wordt terugverdiend – bijvoorbeeld als de bouwkosten of de elektriciteitsprijs structureel laag blijven. Er moet ook rekening worden gehouden met potentieel hoge, maar onzekere ontmantelingskosten. Het is de vraag in hoeverre marktpartijen bereid zijn om een dergelijke investering te plegen zonder een of andere vorm van overheidssteun (bijvoorbeeld garanties op leningen).

Een eventueel gebrek aan maatschappelijke acceptatie van kernenergie lijkt op dit moment in Nederland geen grote belemmeringen op te leveren. De voorgenomen bouw van een tweede kerncentrale in Borssele heeft althans vooralsnog niet tot massaal actief verzet vanuit de samenleving geleid.

6.8.3 Benutting van CO₂-vrije elektriciteit door omzetting in gas

De inzet van zonnestroom en windenergie leidt op dit moment nog niet tot problemen met de afzet van de opgewekte elektriciteit. Dat geeft nog enige tijd om oplossingen voor mogelijke toekomstige balanceringsproblemen voor te bereiden. De optie om schone elektriciteit om te zetten in brandstoffen vergroot de betekenis van schone elektriciteit als bouwsteen voor een CO₂-arm Nederland in 2050 aanzienlijk, en kan Nederland bovendien minder afhankelijk maken van ontwikkelingen buiten zijn grenzen. De optie kan worden ingezet om pieken in het aanbod van elektriciteit niet helemaal verloren te laten gaan. Er kan ook extra schone elektriciteit voor worden geproduceerd. Een haalbaarheidsstudie lijkt een eerste stap. Daarbij kunnen de opties worden verkend voor benutting van de geproduceerde waterstof en eventuele omzetting van waterstof naar methaan of methanol door een reactie met CO₂. In het laatste geval kan een combinatie met biomassavergassing een zinvol onderdeel van een haalbaarheidsstudie zijn.

Grootschalige toepassing is pas aan de orde als er ook grootschalige opwekking met wind en zon is gerealiseerd en speelt daarom pas na 2030. Ook grootschalige toepassing van biomassavergassing zal naar verwachting pas na 2020 aan de orde zijn.

6.8.4 Slimme netten op lokaal niveau

De bijdrage van slimme netten en vraagsturing bij huishoudens aan het verminderen van de CO₂-emissie lijkt beperkt (in ieder geval tot 2020), maar past wel bij een decentraal model waarin meer controle over het distributienetwerk nodig is. Met de inzet van elektrische auto's kan de bijdrage iets groter worden.

Netwerkbedrijven zijn een cruciale speler voor de ontwikkeling en het beheer van de vereiste netwerkinfrastructuur. De Nederlandse netbeheerders hebben al een aanzienlijk aantal activiteiten ontwikkeld op het gebied van netwerkvernieuwing, -versterking en -uitbreiding. Ook zijn ze betrokken bij verschillende proefprojecten voor slimme netten. De regulering van de netbeheerders geeft echter weinig stimulans voor innovatieve projecten. Een aanpassing van de regulering, bijvoorbeeld door het opnemen van een post voor innovatie bij het vaststellen van de tarieven, kan hier een oplossing zijn (mogelijk samen met een sectorale afspraak of verplichting om netwerkinnovatie uit te voeren). Ook moet meer flexibiliteit binnen de dag in kleinverbruikersprijzen mogelijk zijn, omdat anders geen verschuiving van perioden met schaarste naar die met overschot wordt bevorderd.

Zowel bij de toepassing van slimme netten en vraagsturing, als bij de aanleg van nieuwe netwerkinfrastructuur is de sociale acceptatie belangrijk. Bij de invoering van slimme meters spelen ook vragen over de veiligheid van persoonsgegevens.

Proefprojecten voor slimme netten zijn belangrijk om een beter inzicht te geven in de mogelijkheden om in de toekomst met vraagsturing aan het balanceren van het elektriciteitssysteem bij te dragen. De ondersteunende infrastructuur, zoals slimme meters en aanstuurbare apparatuur, moet ook geleidelijk worden ontwikkeld en geïntroduceerd. Het gaat hierbij zowel om technische en economische aspecten als om regelgeving. In een latere fase kunnen de proefprojecten voor slimme netwerken geleidelijk worden uitgebreid, en bovendien worden gekoppeld aan nieuwe technologieën, zoals elektrische auto's.

6.8.5 Waterstofauto's

Waterstofauto's zijn volop in ontwikkeling, maar staan op dit moment minder in de belangstelling dan elektrische auto's. Waterstofauto's met een brandstofcel zijn efficiënter dan auto's met een verbrandingsmotor, maar meestal minder efficiënt dan elektrische auto's. Ook over de hele keten gezien treden er in het geval van waterstof in het algemeen meer energieverliezen op dan bij elektriciteit. Waterstof kan echter op vele manieren worden geproduceerd, en het verschil hangt sterk af van de ketens die worden beschouwd.

Daartegenover staat het voordeel dat de energiedichtheid van waterstof in een tank groter is dan van een accu, en dat waterstof bovendien onderweg kan worden getankt. Dat maakt een brandstofcelauto op waterstof beter geschikt voor lange afstanden dan een elektrische auto, al is het rijden op benzine of diesel op dat punt nog superieur. Gezien de beperkte mogelijkheden om de broeikasgasemissies van vrachtverkeer terug te dringen, zou een verkenning van de mogelijkheden van vrachtauto's op waterstof zinvol zijn. De infrastructuur voor de distributie van waterstof kan daarbij betrekkelijk eenvoudig zijn, door deze onder te brengen bij tankstations langs snelwegen en transportbedrijven. Lokale productie met elektrolyse is daarbij een optie.

Verder onderzoek naar de verbetering van de brandstofcel, de opslag van waterstof en de productie van waterstof moeten het kostenniveau verder omlaag brengen. De stap naar de productie van grotere series lijkt nog enige jaren weg. Uit het perspectief van de overheid lijkt het echter verstandig de impulsen voor uitbreiding van het rijden in emissievrije auto's zodanig in te richten dat marktpartijen zelf de keuze voor een technologie kunnen maken. Er moet echter voor worden gewaakt dat de beschikbaarheid van meer opties tot een te afwachtende houding leidt.

6.8.6 Warmtenetten

Momenteel zijn er in Nederland dertien grootschalige warmtenetten, met in totaal 227.000 aangesloten verbruikers. Een groot deel is in de jaren tachtig van de vorige eeuw met steun van de overheid aangelegd. De warmte is voor het overgrote deel afkomstig van elektriciteitscentrales; een klein deel wordt geleverd door een afvalverbrandingsinstallatie. Bedacht moet worden dat het restwarmteaanbod bij een groot aandeel wind en zon in de elektriciteitsopwekking in de toekomst wellicht lager is dan nu. Alternatieve warmtebronnen zijn industriële restwarmte, en in gebieden waar de ondergrond geschikt is, kan ook aardwarmte worden gebruikt.

In beginsel lijkt de aanleg van nieuwe warmtenetten het meest kansrijk in nieuwe wijken, omdat dit minder ingrijpend en kostbaar is dan in bestaande wijken. Nieuwbouw kan echter ook zeer energiezuinig worden ingericht, en daarmee kan de warmtevraag zo laag worden dat een andere vorm van warmtevoorziening goedkoper is. In bestaande wijken is verregaande energiebesparing niet altijd gemakkelijk realiseerbaar en kan warmtevoorziening via een warmtenet toch de meest rendabele oplossing zijn. Uitbreiding van bestaande warmtenetten zal daarbij goedkoper zijn dan de aanleg van een volledig nieuw warmtenet.

De prikkel om te investeren in nieuwe warmtenetten is momenteel echter niet erg groot. Omdat de benodigde investeringen hoog zijn in verhouding tot de jaarlijkse opbrengsten, zijn de terugverdientijden in het gunstigste geval slechts iets korter dan de technische levensduur. Bovendien bestaat er bij potentiële investeerders onzekerheid of de investeringen hoe dan ook worden terugverdiend: binnen de looptijd van projecten (ongeveer 30 jaar) kunnen de kosten van warmteproductie variëren, terwijl de verkoopprijs via het Niet-Meer-Dan-Anders-Principe is gebonden aan de gasprijs. Een of

andere vorm van opbrengstgarantie kan hier een oplossing zijn, maar deze kan alleen worden geboden door de overheid. Voor projectontwikkelaars en ondernemers in de glastuinbouw vormen de lange vergunningtrajecten een risico voor het kritische tijdspad van een nieuwbouw- of renovatieproject (LEI 2008). Om deze risico's te vermijden, zal een projectontwikkelaar geneigd zijn om te kiezen voor verwarming met gas. Hier is verkort van de vergunningprocedures het devies.

Gezien het grote aantal partijen dat bij een warmteproject betrokken is, lijkt de aanwezigheid van een of meerdere regisseurs, die zich geïnteresseerd voelen om het project tot stand te brengen, een belangrijke succesfactor. Deze regisseurs zouden kansen en partijen bij elkaar moeten brengen, en zorgen voor contractvorming en realisatie. Hier lijkt een belangrijke rol weggelegd voor lokale overheden: voor de eerste stappen zijn provincies de voor de hand liggende partij, en voor de laatste stappen de gemeenten (CE 2009).

6.8.7 IJzer- en staalproductie

Hoewel er veel aandacht is voor alternatieve schone processen, zijn er op de korte termijn ook maatregelen mogelijk die tot efficiencyverbetering en energiebesparing leiden. De bedrijfstak zelf verwacht dat hiermee in totaal zo'n 14 procent winst kan worden geboekt (VNMI/AVNEG 2011). Daarnaast is afvang en opslag van CO₂ een belangrijke technologie voor emissiereductie bij de ijzer- en staalproductie, ook al vanwege de ligging vlak bij de Noordzee. Toepassing bij het huidige proces is relatief duur en kan maar een beperkt deel (circa 40 procent) van de bij diverse processtappen vrijkomende CO₂ elimineren. De termijn voor realisatie hangt mede af van de snelheid waarmee de infrastructuur voor transport en opslag wordt ingericht.

Er zijn alternatieve processen mogelijk, die in combinatie met CO₂-afvang een veel lagere emissie opleveren. Voor de meest veelbelovende processen is echter nog een ontwikkelingstraject te gaan. Dat zou betekenen dat emissiereducties pas na 2030 worden gerealiseerd. Het is bij een ingrijpende procesvernieuwing trouwens de vraag of de investering in Nederland zal worden gedaan.

Binnen de staalsector loopt een internationaal samenwerkingsproject voor de ontwikkeling van een nieuw proces, Hlsarna, waarvoor momenteel in Velsen een proefinstallatie wordt gebouwd. Dit proces combineert de belangrijke processtappen in één reactor. Door die combinatie en door de hoge concentratie CO₂ in het vrijkomende gas, is het proces uitermate geschikt voor combinatie met CO₂-afvang. Het proces zal rond 2030 beschikbaar zijn voor grootschalige toepassing.

Daarnaast komen na 2025-2030 naar verwachting diverse procesvarianten beschikbaar voor het produceren van *Direct Reduction Iron* met gebruik van gas. Deze leveren bij combinatie met CO₂-afvang ook zeer lage emissies. Er lopen proeven in Europa naar *Top Gas Recycling Blast Furnace* bij daarvoor aangepaste hoogovens. Op grond van deze

proeven zouden CO₂-emissiereducties tot ongeveer 75 procent mogelijk zijn bij toepassing van CO₂-afvang.

6.8.8 Raffinaderijen

Ook voor olieraffinaderijen is de afvang van CO₂ een belangrijke optie voor emissievermindering. Toch komt de wellicht grootste uitdaging te liggen in verdere procesvernieuwing om in te spelen op zowel veranderingen in de grondstoffen (zwaardere olie, bio-olie) als in het productenpakket. Dit procesinnovatieproces zal zich uitstrekken over meerdere decennia en is mede afhankelijk van andere ontwikkelingen, zoals de verschuiving van vloeibare fossiele transportbrandstoffen naar biobrandstoffen, elektriciteit en waterstof en richtlijnen voor brandstoffen in de scheepvaart.

6.8.9 Chemische industrie

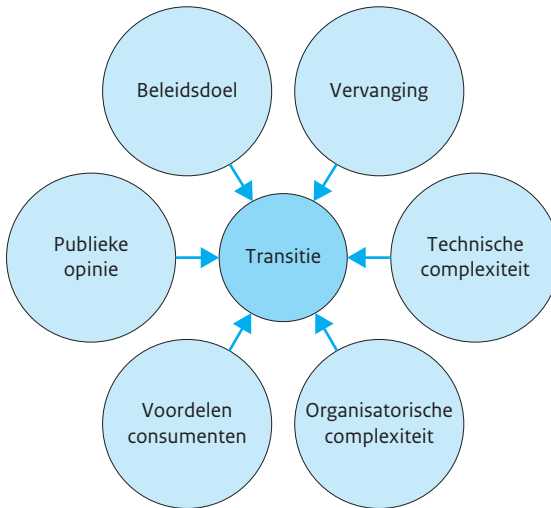
Binnen de chemische industrie gaat het om een breed scala aan processen en daarmee ook aan mogelijkheden om emissies te reduceren. Naar verwachting kunnen maatregelen redelijk gespreid in de tijd worden genomen. Voor een grootschalige verschuiving van het olieproduct nafta naar biomassa als grondstof voor de plasticproductie zullen vele stappen op de route vergelijkbaar zijn met die zoals beschreven voor bio-energie. Daarbij ligt er de uitdaging om het volledige spectrum van chemische verbindingen dat nu op basis van olieproducten wordt gemaakt, ook met biomassa te produceren. Voor de korte koolstofketens C₁ (methaan, methanol), C₂ (ethanol en daaruit etheen, azijnzuur), C₃ (propaan, glycerine, melkzuur) en C₄ (butanol, isobuteen) zijn er al diverse productieroutes, gekoppeld aan bijvoorbeeld de huidige productie van biobrandstoffen of processen in de voedselketen. Voor belangrijke stoffen met langere koolstofketens of aromaten ligt daar nog een ontwikkelingsuitdaging.

6.8.10 Landbouw

Maatregelen om methaan en lachgasemissies uit de landbouw verder te verminderen, zijn deels beschikbaar en kunnen gaandeweg worden genomen. Enkele maatregelen zijn op zichzelf rendabel, bijvoorbeeld minder kunstmest gebruiken, maar vergen investeringen in informatie- en gps-technologie. Andere maatregelen, zoals rantsoenaanpassingen, zijn deels nog niet beschikbaar; hier wordt momenteel onderzoek naar gedaan. Mestvergisting heeft een groot aandeel in de potentiële emissiereductie. De huidige beleidsstimulans voor mestvergisting richt zich op de opbrengstkant (hernieuwbaar gas). Het vergisten van mest is echter vooral ook interessant vanwege de vermeden emissies van methaan die anders zouden optreden in mestopslagen en stallen.

Het bevorderen van het gebruik van schone productietechnieken hangt vooral af van de eisen die de keten of het beleid stelt en van de mate waarin het gebruik (nog meer) onder de aandacht van (aankomende) agrariërs komt. Van belang hierbij is te laten zien wat de mogelijkheden zijn zonder gevolgen voor de opbrengsten, en welke

Figuur 6.7
Snelheidsbepalende factoren voor een transitie



ontwikkelingen ertoe bijdragen dat deze maatregelen ook rendabeler kunnen worden. Voor vermindering van de consumptie van dierlijke producten is een groot draagvlak binnen de maatschappij nodig. Veranderingen gaan waarschijnlijk geleidelijk. Het verminderen van voedselverliezen is waarschijnlijk een sneller spoor.

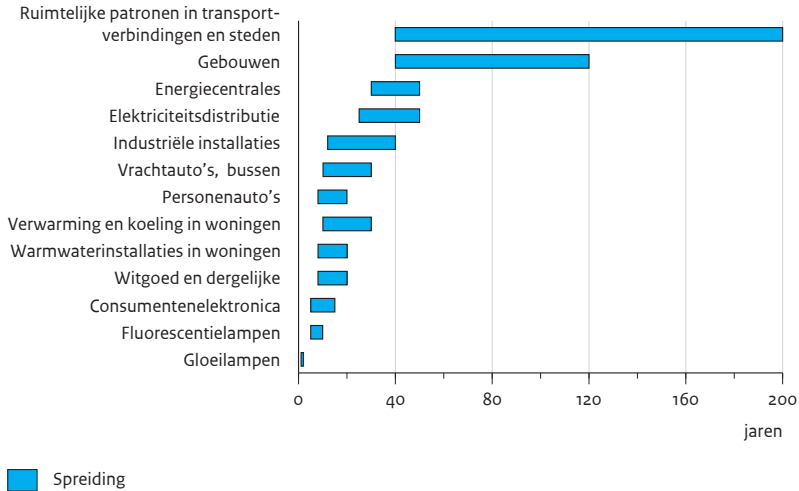
6.9 Benodigde termijnen voor transities

6.9.1 Snelheidsbepalende factoren

Er is nog iets minder dan veertig jaar te gaan voordat het jaar 2050 is bereikt. Er zijn bindende doelstellingen geformuleerd voor de CO₂-emissies in 2020. Daarop is het beleid gericht. Betekent dit dat volgende stappen pas na 2020 hoeven te worden genomen? In de eerste plaats constateren we dat vele van de genoemde en te overwegen vervolgstappen op basis van het bestaande beleid niet vanzelf zullen worden gezet. Elektrische auto's, biomassavergassing, windenergie van zee, warmtenetten, dergelijke vernieuwingen zijn immers duurder dan bestaande alternatieven en niet of slechts in beperkte mate nodig om de doelen van 2020 te halen.

Grootschalige introductie van nieuwe technologie kost tijd. Uiteraard zijn er 'snelle' voorbeelden, zoals van mobieltjes (toch nog ruim twintig jaar na de eerste niche) of in een iets verder verleden, maar dichterbij het onderwerp, het Nederlandse gasnet (circa

Figuur 6.8
Technische levensduur van apparaten, installaties en infrastructuur



tien jaar). Wat maakte dat het daarbij zo snel ging? In figuur 6.7 staan de belangrijkste snelheidsbepalende factoren. We lopen die elk langs.

Vervanging

Kapitaalvernietiging is uiteraard een onwenselijke zaak. Daarom is het streven om in de praktijk de levensduur van een technisch systeem zo goed mogelijk te benutten. Daarmee bepaalt de levensduur in sterke mate de snelheid van verandering (zie figuur 6.8). Voor infrastructuur, gebouwen en grote installaties overschrijdt de levensduur al de veertig jaar die nog te gaan zijn tot 2050. Dat betekent dat het wenselijk is er vanaf nu al voor te zorgen dat nieuwe investeringen passen in het beeld voor 2050. Overigens zijn er voor gebouwen en infrastructuur wel momenten voor renovatie of groot onderhoud die nog kunnen worden benut. Grote installaties hebben vaak een economische afschrijvingstermijn die korter is dan de technische levensduur, waardoor eerdere vervanging toch een punt van overweging kan worden.

Apparaten en auto's hebben een relatief korte levensduur, waardoor er nog enkele generaties zijn te gaan voordat 2050 wordt bereikt. Daarbij moet echter worden bedacht dat aan deze apparaten en voertuigen industriële installaties zijn gekoppeld voor hun productie. Deze hebben een langere levensduur. Vervanging is niet alleen een technische kwestie. Ook vervanging van institutionele structuren kost tijd. Vanuit bestaande belangen en machtsstructuren valt het in vele gevallen niet mee om tot snelle vernieuwing daarvan te komen.

Technische complexiteit

De technische complexiteit kan ertoe leiden dat er veel tijd nodig is om een nieuwe technologie te brengen tot grootschalige toepassing. Het doorlopen van de leercurve kost tijd. Voor energietechnieken leert de ervaring dat er in veel gevallen ongeveer dertig jaar zit tussen het aantonen dat een idee ook werkt en een toepassingsniveau van 1 procent van de potentiële markt (Shell 2011). Voorbeelden zien we al bij een nieuw proces voor ijzerproductie, de ontwikkeling van biomassavergassing tot het basisproces voor de synthese van nieuwe brandstoffen of chemicaliën, en de ontwikkeling van fotovoltaïsche cellen op basis van organische stoffen.

Organisatorische complexiteit

De complexiteit van een systeeminnovatie wordt mede bepaald door onderlinge afhankelijkheden binnen het systeem, waardoor potentiële investeerders voor succes afhankelijk zijn van investeringen van andere bedrijven. Bij nieuwe energiedragers zijn nieuwe technieken en nieuwe infrastructuur allebei nodig. Ook in nieuwe productieketens zijn er verschillende partijen die iets nieuws moeten oppakken. Hoe meer afhankelijkheden, des te voorzichtiger de stapjes waarmee partijen elkaar volgen. Dat kost dus tijd. Bovendien wordt het daarbij nog lastiger om kapitaalvernietiging geheel te voorkomen, waarbij een blokkade voor systeeminnovatie dreigt.

Voordeel consumenten

De voorbeelden van 'snelle' veranderingen in het begin van deze paragraaf hebben alles te maken met de aantrekkelijkheid van het resultaat voor de consument. Een mobieltje biedt tal van functies waarover de consument daarvoor nog niet kon beschikken. En ook de vervanging van kolen door gas bood de consument naast energie ook veel meer gemak, comfort en minder vuile handen. Rond energie maken de besproken maatregelen en nieuwe technieken veelal geen verschil voor de consument. Dat geldt voor producten als elektriciteit of warm water. Soms zijn er aspecten die wel verschil maken, zoals bij de elektrische auto of een ander verwarmingssysteem.

Publieke opinie

De publieke opinie over de risico's of neveneffecten van een nieuwe technologie kan een belangrijk vertragend effect hebben op de introductie. We bespreken in dit rapport niet alle risico's en de risicobeleving van verschillende technieken. Maar voor bijvoorbeeld kernenergie, de opslag van CO₂ op land, biobrandstoffen op basis van landbouwgewassen of windmolens op land zijn de gepercipieerde minpunten van de technieken van grote invloed geweest op de introductie. Een positief imago daarentegen kan ook een stimulans zijn om juist wel gebruik te maken van een techniek, iets wat met zonnepanelen als pluspunt speelt en wellicht ook met elektrische voertuigen kan komen. De publieke probleemperceptie van het klimaat kan ook een belangrijke rol spelen in de mate van steun voor alle maatregelen om de broeikasgasemissies te verminderen, ook in de vorm van steun voor klimaatbeleid.

Beleidsdoelen

Algemene of specifieke beleidsdoelen kunnen het marktperspectief voor nieuwe technieken vergroten. We komen hier in hoofdstuk 8 op terug. Voor de ontwikkeling van vele van de beschouwde deelsystemen zijn de meeste van de genoemde factoren niet bijzonder gunstig. Er moet daarom rekening worden gehouden met relatief lange termijnen voor de beoogde systeeminnovaties. Wachten tot na 2020 verkleint daarom de kans dat de mogelijkheden van de diverse opties voldoende kunnen worden benut. We illustreren dit aan de hand van het voorbeeld van elektrisch rijden, waarin vele van de genoemde factoren een rol spelen.

6.9.2 De snelheid van systeeminnovatie naar elektrisch rijden

De vervangingstermijnen van zo'n vijftien jaar voor auto's zijn geen belemmering voor een eventuele snelle overgang van de traditionele typen met verbrandingsmotoren naar elektrische auto's. Potentieel kan meer dan de helft van de kilometers in personenauto's elektrisch worden afgelegd. Om in 2050 daadwerkelijk zo veel elektrische voertuigen te zien rondrijden, moet de verkoop van nieuwe auto's tussen 2035 en 2040 daarvan al een goede afspiegeling zijn. Dat geeft nog 25 jaar de tijd. Ervaringen met de hybride auto laten zien dat twaalf jaar na de eerste introductie (in 1997) op de markt een aandeel van 0,25 procent van het wagenpark is bereikt (CBS 2009). Het kan sneller gaan, nu meer fabrikanten dan destijds alleen Toyota al in de beginfase meedoen.

De productieketen begint niet in de autofabriek. Daarvoor zit de accuproductie en de grondstoffenwinning, waarschijnlijk van lithium. De groei van beide zal in balans moeten blijven en daarom zeker niet explosief zijn. Onbalans kan tot grote prijschommelingen leiden en daarmee tot problemen voor de bedrijven. Daarbij moet ook rekening worden gehouden met het feit dat de productie van verbrandingsmotoren met alle onderdelen daarvan moet worden afgebouwd, en die voor elektromotoren moet worden uitgebreid. Die afbouw zal evenmin zonder slag of stoot gaan, al was het maar om kapitaalvernietiging te voorkomen. Voor de transitie in de productieketen is die 25 jaar al krap.

Het feit dat de elektrische auto en de plug-in hybride op dit moment ook nog aanzienlijk duurder zijn, betekent dat er een leertraject nodig is. Grootschaliger toepassing is nodig, onder andere om de productie van de accu's te verbeteren en de prijs daarmee omlaag te brengen. Het binnen de perken houden van de extra kosten is echter evenzeer van belang. Dat maakt een zorgvuldige afweging over de snelheid van de groei in de komende jaren gewenst. Het is dan ook onwaarschijnlijk dat het aandeel in de verkoop van nieuwe auto's in 2020 het niveau van enkele procenten zal overstijgen.

Een sterke voorkeur van de consument voor de elektrische auto kan de omschakeling zeker versnellen, maar het omgekeerde lijkt eerder het geval. Het gebruiksgemak is door de beperkingen in de actieradius en de lange duur van het laden minder dan van de huidige typen auto's. Het leertraject in de komende tien jaar kan het beeld veranderen ten gunste van de elektrische auto, maar zekerheid daarover bestaat niet. Daarbij komt de onzekerheid van vele consumenten of ze als bezitter van een elektrische auto wel de garantie van een oplaadpunt bij huis hebben dat altijd voor ze beschikbaar is. Dat raakt

aan het gevoelige punt van voldoende parkeerplaatsen. Zonder duidelijkheid daarover zullen autofabrikanten huiverig blijven hun productie voor een groot deel om te zetten naar elektrische auto's. Toch zou dat tussen 2020 en 2035 moeten gebeuren. De conclusie uit deze beschouwing kan niet anders zijn dan dat er haast is geboden met het veranderingstraject om in 2050 het gewenste resultaat te bereiken.

Directe kosten van een emissiearm energiesysteem en economische effecten van de transitie

7.1 Inleiding

In de analyses met E-design zijn voor alle combinaties van vraagvarianten en sets van aanbodtechnologieën de directe maatschappelijke kosten berekend in 2050. Bovendien zijn deze kosten vergeleken met de directe kosten in het referentiebeeld waarin de huidige technologie wordt gebruikt. De gevolgde methodiek, de gehanteerde aannames, de resultaten en onzekerheden worden besproken in paragraaf 7.2 en 7.3. In 2050 zullen veel schone technieken na het doorlopen van de leercurve in prijs zijn gedaald. Tijdens het doorlopen van de leercurve liggen de kosten van deze schone technieken nog hoger dan in 2050, en zullen ze een barrière vormen voor hun toepassing (paragraaf 7.4). In paragraaf 7.5 reflecteren we op de gevolgen van de omschakeling naar een emissiearm energiesysteem voor de Nederlandse economie en de kansen daarbij voor het Nederlandse bedrijfsleven.

7.2 Kostencomponenten van het energiesysteem

De directe kosten die gepaard gaan met het energiesysteem bestaan uit twee delen. Enerzijds zijn er kosten die samenhangen met het verbruik van energiegrondstoffen, zoals aardolie, aardgas, uranium, en biomassa. Anderzijds zijn er de kosten die gepaard gaan met de aanschaf en het gebruik van de technologieën, zoals de installaties waarmee energiedragers worden geproduceerd, de infrastructuur voor het transport van energiedragers en de fabrieken, gebouwen of apparaten waarin energie wordt gebruikt.

Naast de directe kosten zijn er ook indirecte kosten verbonden aan het gebruik van energie. De uitstoot van broeikasgassen, verzurende stoffen en fijn stof die plaatsvindt bij het gebruik van energie, leidt mondiaal tot economische schade, gezondheidsschade en schade aan natuur; deze gevolgen kunnen als negatieve externe effecten van het energiesysteem worden beschouwd. Deze indirecte kosten, of de uitsparing ervan, worden in deze studie niet gekwantificeerd, noch meegerekend. Uitgangspunt bij het streven naar 80 procent emissiereductie in Nederland en andere geïndustrialiseerde landen, is dat het beperken van de broeikasgasuitstoot – en daarmee het verminderen van de kosten die met de negatieve externe effecten samenhangen – op mondiale schaal meer welvaart oplevert dan doorgaan met de huidige technologieën.

De totale energiegrondstofkosten in het energiesysteem worden bepaald door de prijzen van en de hoeveelheden gebruikte grondstoffen. De prijzen voor de energiegrondstoffen zijn afhankelijk van de mondiale vraag, en zijn op de lange termijn erg onzeker. Zonder mondiaal klimaatbeleid veronderstelt het Internationaal Energie Agentschap (IEA) dat de prijzen van fossiele brandstoffen de komende decennia zullen stijgen, omdat de mondiale vraag steeds verder zal toenemen en de kosten van extra productie stijgen. In deze studie is daarbij aangesloten (zie tabel 7.1). De verwachting is dan ook dat zonder wijzigingen in het energiesysteem de totale energiegrondstofkosten flink zullen toenemen. Bij klimaatbeleid zal er minder extra vraag zijn. In het *IEA Blue Map*-scenario, waarin een verregaande emissiereductie (mondiaal 50 procent) en een sterk verminderde vraag naar fossiele brandstoffen worden verondersteld, worden daarom aanzienlijk lagere prijzen verwacht dan in de referentie zonder extra beleid (zie tabel 7.1). Het gebruik van energiegrondstoffen in Nederland is op de totale mondiale vraag nauwelijks van invloed en zal op zichzelf dus de prijzen nauwelijks beïnvloeden. In de analyses in dit rapport is echter wel gerekend met hogere prijzen bij een hogere vraag en lagere prijzen bij een lagere vraag, omdat wordt verondersteld dat het gebruik van energiegrondstoffen in Nederland een mondiale trend weerspiegelt. De keuze van het prijsniveau in het referentiebeeld is van grote invloed op de berekende baten voor uitgespaarde energiegrondstofkosten in de CO₂-arme systeemvarianten.

Biomassa zal naar verwachting een grotere rol gaan spelen in het energiesysteem. De prijsontwikkeling daarvoor is echter met nog meer vraagtekens omgeven. In de eerste plaats zijn er vele typen biomassa. Speciaal geteelde energiegewassen hebben een hogere prijs dan reststromen, waarvan de bruikbaarheid voor andere toepassingen ook weer kan verschillen. Bij strikte duurzaamheidscriteria zal het aandeel van reststromen in 2050 waarschijnlijk groter zijn dan nu. De huidige kosten voor biomassaproductie variëren van 0 tot 10 euro per gigajoule (GJ) (IPCC 2011).

De productiekosten van biomassa kunnen in 2050 aanzienlijk lager liggen dan nu. Volgens Hoogwijk et al. (2008) zou in 2050 zo'n 100 tot 300 exajoule (EJ) biomassa kunnen worden geproduceerd tegen kosten van 2,3 dollar per GJ. Naarmate het aandeel reststromen zonder andere toepassingen groter wordt, zal de gemiddelde prijs dalen.

Tabel 7.1

Veronderstelde kosten* van energiedragers in 2050

	2008	2050, referentie	2050, bij mondiaal klimaatbeleid
Olie	11,9 (92)	15,6 (120)	9,1 (70)
Gas	7,4	10,7	6,3
Kolen	3,1	3,3	1,7
Biomassa	0-10	0-10	0-12

Bron: IEA (2010); IPCC (2011)

* Kosten zijn in euro per GJ (prijspeil 2010). De olieprijs is ook gegeven in \$2008 per vat (getallen tussen haakjes).

Toenemende vraag kan weer een prijsopdrijvend effect hebben. In de verschillende varianten variëren deze tussen gemiddeld 2 en 7 euro/GJ.

De kosten voor de technologie bestaan deels uit de kosten voor de aanschaf (de prijs van het bouwen van installaties, gebouwen en infrastructuur of van het produceren van apparaten), en deels uit kosten voor *operation and maintenance* (O&M). Voor het berekenen van de jaarlijkse kapitaallasten is in deze studie voor alle technologieën een discontovoet van 6 procent gehanteerd.

In de vergelijking van de kosten van de geanalyseerde energiesystemen zijn zowel optimistische als pessimistische schattingen gebruikt. Voor het beeld tot 2050 zijn de investeringskosten voor vrijwel alle nieuwe technologieën namelijk met grote onzekerheid omgeven. De investeringskosten voor technologieën zijn gedeeltelijk onderhevig aan leereffecten. Naarmate een bepaalde technologie in meer installaties, gebouwen of apparaten wordt gebruikt, zal deze goedkoper worden. De snelheid van prijsdaling en de eventuele bodemprijs zijn echter op voorhand moeilijk te bepalen, zeker als een technologie in de beginfase van de ontwikkeling zit.

Een toenemend gebruik van een technologie kan echter ook prijsopdrijvende effecten hebben. De technologie wordt in eerste instantie vaak op een gunstige locatie toegepast, maar bij uitbreiding moeten ook ongunstiger locaties worden gebruikt, bijvoorbeeld bij wind op zee steeds verder uit de kust, bij biomassa het telen op gronden met een lagere opbrengst, bij waterkracht locaties met kleinere vervallen of bij zonnestroom het werken met steeds kleinere dakoppervlakken. Ook kunnen (tijdelijk) prijsopdrijvende effecten ontstaan door, bijvoorbeeld, beperkingen in de beschikbaarheid van grondstoffen of gespecialiseerd materieel en personeel. Dit effect wordt momenteel waargenomen bij de bouw van windparken op zee, waar de prijzen van staal en koper en de beperkte beschikbaarheid van installatievaartuigen de daling van de kosten temperen (Van der Zwaan et al. 2011).

Leereffecten kunnen het aantrekkelijk maken om te wachten met het aanschaffen van nieuwe technologieën tot de prijs ervan is gedaald. Nederland heeft bijvoorbeeld in verhouding minder subsidiegeld besteed aan de uitrol van zon-PV dan Duitsland, maar profiteert wel van de huidige prijsdalingen. Er kleven echter ook nadelen aan het lang wachten met investeren in nieuwe technologie. Ten eerste kan het uitstellen van investeringen op grote schaal leiden tot een vertraging van het leereffect – als de technologie minder wordt toegepast, wordt er immers ook minder geleerd. Ten tweede treedt een gedeelte van de leereffecten alleen lokaal op, bijvoorbeeld waar dit betrekking heeft op lokale omstandigheden of het inwerken van benodigd personeel. Ten derde kan juist vroeg instappen in nieuwe technologie kansen scheppen voor Nederlandse bedrijven.

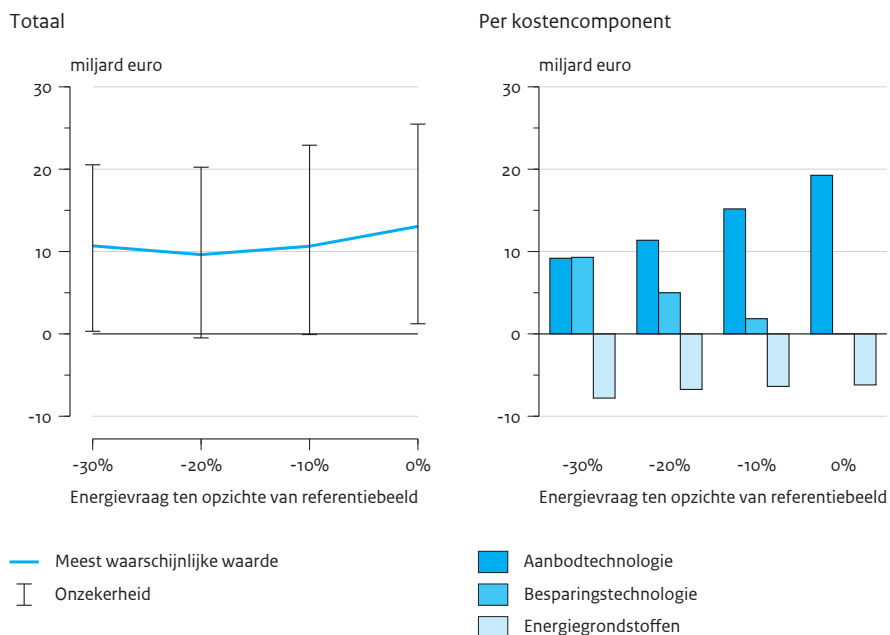
We hebben al eerder aangestipt dat de schade aan economie, mens en natuur hier niet is meegeteld bij de kosten van het energiesysteem. In de huidige marktsetting heeft het uitstoten van broeikasgassen naast deze schade echter ook een marktprijs, de CO₂-prijs, die in feite een reflectie is van de waarde die nu in Europa wordt toegekend aan het vermijden van klimaat schade. In de analyse is ook deze buiten beschouwing gebleven. Uit het oogpunt van een individu of bedrijf dat voor een investeringsbeslissing staat, zijn uitgespaarde kosten voor CO₂-emissierechten uiteraard zeer belangrijk. Maar aangezien het daarbij om zogenoemde overdrachten gaat, worden ze niet meegeteld in de hier gehanteerde maatschappelijke kostenberekening. Om dezelfde reden zijn ook uitgespaarde energiebelastingen niet meegenomen.

7.3 Analyse van de jaarlijkse systeemkosten van een toekomstig energiesysteem

De energiecomponent van investeringen in installaties, apparaten en gebouwen is vaak moeilijk af te bakenen van de totale investering. Bij auto's bijvoorbeeld, worden vaak alle kosten voor het energiezuinigere voertuig meegeteld, terwijl bij gebouwen slechts de directe kosten voor de isolatie en het verwarmings- en/of koelsysteem worden meegeteld. Ook worden soms kosten bepaald op basis van meerkosten, bijvoorbeeld: wat kost een passiefhuis meer dan een standaard huis, terwijl in werkelijkheid in het standaard huis uiteraard ook al energiegerelateerde kosten worden gemaakt. De optelsom van dit soort ongelijksoortige kostencijfers heeft in absolute zin weinig betekenis. Echter, wanneer de kostencijfers in verschillende systeemvarianten op dezelfde manier worden berekend, dan kan het berekende verschil dienen als indicatie voor meer- of minderkosten bij verschillende systeemconfiguraties. Voor deze vergelijking is het referentiebeeld voor 2050 gebruikt, met de veronderstelling dat daarin voor het energieaanbod de huidige technieken worden gebruikt. Door de grote onzekerheid in zowel de toekomstige prijzen van energiegrondstoffen als in de investeringskosten voor technologieën, zijn de schattingen van de meerkosten van een toekomstig schoon energiesysteem met een grote bandbreedte omgeven.

Figuur 7.1

Meerkosten voor emissiereductie van broeikasgassen met 80 procent ten opzichte van referentiebeeld met huidige aanbodtechnologie, 2050



De analyse is gericht op de jaarlijkse systeemkosten in 2050. Bij technologieën waarbij kostendalingen worden verwacht, is het installatiemoment van invloed op de kosten. In de analyse is dit moment niet gespecificeerd. De gebruikte data in het E-designmodel zijn expertschattingen voor technologiekosten in een energiesysteem in 2050, die zijn gebaseerd op verschillende bronnen. We hebben verondersteld dat de kostenafwijkingen door andere installatiemomenten binnen de breedte vallen die is gekozen voor een optimistische dan wel pessimistische technologieontwikkeling.

Het kan zo zijn dat er van de vele tientallen technieken een aantal minder snel in prijs daalt dan andere. Dit zal ertoe leiden dat de relatief dure technieken minder worden toegepast dan de relatief goedkope technieken. Bij de hierna gepresenteerde kosten is met dit effect rekening gehouden. Ook zijn de kosten van niet-energiegerelateerde maatregelen (vooral in de landbouw) meegenomen.

In het middenpad lijken de totale directe kosten van een systeem met 80 procent broeikasgasreductie ongeveer 10 miljard euro (2010) per jaar hoger te zijn dan wanneer wordt doorgesamen met de huidige technologieën (het referentiesysteem) (figuur 7.1). De onzekerheidsband is echter groot: wanneer met een optimistische bril naar de

technologie- en prijsontwikkeling wordt gekeken, kunnen de directe kosten vergelijkbaar zijn met het referentiesysteem, en wanneer de ontwikkelingen pessimistisch worden ingeschat, kunnen de directe kosten meer dan 20 miljard euro per jaar hoger zijn. De bandbreedte in figuur 7.1 omvat niet alleen de variatie die ontstaat door een optimistische of pessimistische inschatting van de ontwikkeling van technologieën en brandstofprijzen, maar ook de variatie als gevolg van verschillende mogelijke technologieën in de systeemvarianten. We doen in dit rapport geen uitspraak over de waarschijnlijkheid van elk van deze paden. Wel lijkt het op basis van de analyse gerechtvaardigd bij een emissiearm energiesysteem rekening te houden met hogere directe kosten dan bij doorgaan met het huidige systeem zonder emissiereductie. Nogmaals, daarbij is niet met externe effecten en de prijs daarvan rekening gehouden.

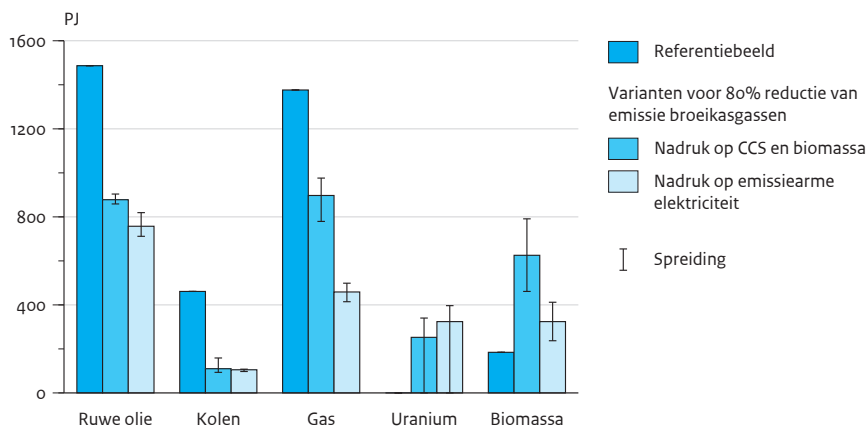
De vergelijking met het referentiebeeld laat zien dat het overschakelen naar een systeem met weinig broeikasgasuitstoot een verschuiving betekent in het kostenpatroon van energiegrondstofkosten naar investeringskosten. Gebruik van emissiearme technologieën, zoals windmolens, zonnepanelen en kernenergie, leiden tot relatief lage (of geen) energiegrondstofkosten, maar hogere investeringskosten. Doordat investeringen voor langere tijd worden aangegaan, terwijl energiegrondstofkosten afhangen van de marktprijs, leidt deze verschuiving tot een grotere voorspelbaarheid in de kostenstructuur van energie.

De totale directe kosten variëren uiteraard tussen de verschillende geanalyseerde varianten voor de eindbeelden. Varianten met meer nadruk op CO₂-afvang en -opslag en inzet van biomassa hebben relatief hogere energiegrondstofkosten en relatief lagere investeringskosten dan varianten met meer nadruk op elektrificatie van het eindgebruik in combinatie met energiegrondstofarme technologie, zoals wind, zon en geothermie. De totale directe kosten in die systeemvarianten zijn door deze *trade-off* opvallend gelijk. Welke combinatie van vraag- en aanbodtechnologieën uiteindelijk de goedkoopste zou zijn, is geen onderdeel van de analyse in dit rapport. Een uitgebreidere analyse zou mogelijk enkele verdere trends aan het licht kunnen brengen, maar door de grote onzekerheden over de energiegrondstofprijzen, de investeringskostenontwikkeling en de technische en maatschappelijke haalbaarheid van de introductie van bepaalde technologieën, blijven uitspraken hierover speculatief.

Vergelijking van de resultaten van systeemvarianten met verschillende energievraag laat zien dat de investeringskosten voor aanbodtechnologieën bij een lagere vraag (logischerwijs) lager zijn. Er hoeft immers minder energie te worden opgewekt. Tegelijk zijn de investeringskosten voor besparingstechnologieën in dat geval hoger. Hoe meer besparing moet worden gerealiseerd, des te duurder zijn de technologieën die moeten worden ingezet. Kanttekening daarbij is dat een lagere vraag ook kan ontstaan door veranderingen in economische structuur, achterblijvende economische groei, of gedragsveranderingen. In die gevallen kan een lage vraagvariant ook gepaard gaan met lagere investeringskosten voor besparingstechnologie.

Figuur 7.2

Verbruik energiedragers, 2050



Zoals verwacht mag worden, resulteert een lagere energievraag in lagere kosten voor energiegrondstoffen. In de analyse lijken verschillen in de vraag slechts tot beperkte verschillen in de inzet van energiegrondstoffen te leiden. Dit komt omdat bij een hoge energievraag ook meer schone technieken (zoals wind en zon) nodig zijn die geen grondstoffen vragen, mede door beperkingen aan de beschikbaarheid van biomassa.

In termen van energie zekerheid geldt dat een vermindering van de emissie van broeikasgassen in alle gevallen ook leidt tot een aanzienlijke vermindering van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen (zie voor een indicatie op basis van een beperkt aantal varianten figuur 7.2). De bijdrage van olie en gas kan in 2050 nog substantieel zijn. Aangezien kernenergie geen onmisbare techniek is, kan de bijdrage van uranium ook nul zijn.

7.4 Kosten als barrière naar een emissiearm energiesysteem

In de overgangsfase van het bestaande naar een nieuw systeem moeten tal van barrières worden overwonnen. Naast technologische, organisatorische, institutionele en gedragsmatige hebben die barrières vaak te maken met kosten. De gevestigde technologieën hebben vaak gedurende vele jaren een leer- en optimalisatieproces doorlopen, terwijl de nieuwe, schonere technologieën hieraan nog moeten beginnen. Schonere technologieën hebben daardoor een achterstand ten opzichte van de

gevestigde. Ook is het nog maar de vraag of schonere technologieën, ook na het doorlopen van de leercurve, goedkoper blijken te zijn dan de huidige technologieën.

Schonere technologieën zijn vaak kapitaalintensiever. Vanwege de hogere bedragen en de consequenties op de langere termijn bij dergelijke investeringen, wordt hierover op een andere manier besloten dan bij lopende kosten, zoals de inzet van energiegrondstoffen. In deze paragraaf gaan we in op enkele afwegingen in dit besluitvormingsproces, die barrières kunnen vormen voor verdere ontwikkeling richting een emissiearm energiesysteem. Door met beleid hierop in te spelen, kan de transitie worden versneld.

Investeringsvragen in het algemeen een kosten-batenafweging, of het nu gaat om een miljardenfinanciering voor het bouwen van een windmolenpark of het investeren van extra moeite en tijd bij het gebruik van de fiets in plaats van de auto. Voor de afweging van kosten en baten hanteren organisaties en individuen veelal de terugverdientijd of *return on investment* als criterium voor het al dan niet besluiten tot een investering. De terugverdientijd hangt uiteraard zowel af van de investeringskosten en rentelasten, als van de vermeden jaarlijkse kosten voor bijvoorbeeld brandstofverbruik. Voor bedrijven hangt de terugverdientijd bovendien af van de mogelijkheid de extra kosten door te berekenen in de productprijs. Wanneer concurrerende bedrijven vergelijkbare maatregelen (moeten) nemen, bijvoorbeeld aangemoedigd door wetgeving, kan de terugverdientijd korter zijn dan wanneer de concurrentie niet zulke kosten hoeft te maken.

In verband met de beperkte beschikbaarheid van kapitaal wordt de *return on investment* daarnaast in het algemeen vergeleken met die van andere mogelijke investeringen, waarbij alleen de gunstigste investeringen worden uitgevoerd. Omdat energiegebruik in veel bedrijven meer randverschijnsel dan *core-business* is, kunnen investeringen in het energiesysteem in die vergelijking gemakkelijk het onderspit delven. Door met beleidsimpulsen de balans van de kosten-batenanalyse te verschuiven in het voordeel van emissiearme technologieën, kunnen investeringen in een emissiearm energiesysteem worden bespoedigd. Die maatregelen kunnen zowel op de kosten- als op de batenzijde zijn gericht.

Een extra mogelijke kostenbarrière bij het op- en ombouwen van het energiesysteem ligt in het vervroegd afschrijven van bestaande technologieën ten behoeve van investeringen in schonere. Ook wanneer een installatie economisch is afgeschreven maar technisch nog goed voldoet, is het voor de gebruiker erg gunstig er nog gebruik van te blijven maken en nieuwe investeringen nog even uit te stellen. Het is daarom belangrijk gebruik te maken van natuurlijke vervangingsmomenten. Doordat de technische levensduur van energietechnologieën soms meerdere decennia beslaat, betekent dit dat de investeringen van nu soms al het beeld in 2050 mede bepalen. Om een emissiearm systeem te realiseren, is dan dus nu reeds de juiste investeringsbeslissing noodzakelijk. De vervangingsmomenten bij verschillende

gebruikers lopen in het algemeen evenwel niet synchroon. Wanneer wordt gebruikgemaakt van natuurlijke vervangingsmomenten zal dit betekenen dat de ene gebruiker reeds een schone techniek gebruikt, terwijl een andere gebruiker dit nog niet doet. Bij ongelijke kosten voor het gebruik van technologieën kan er zo, in het geval van bedrijven, sprake zijn van ongelijke concurrentie. In het geval van ongelijke kosten bij burgers, bestaat een risico op publieke onvrede. Dit is een aandachtspunt voor bijvoorbeeld langjarige isolatieprogramma's van woningen.

Ten slotte heeft ook de onzekerheid over het toekomstbeeld kostenconsequenties. Voor investeringen in de productiecapaciteit geldt dat de grootte van de toekomstige afzetmarkt van producten van groot belang is voor capaciteitskeuzen en terugverdientijden. Maar ook voor bijvoorbeeld investeringen in infrastructuur, zoals bij pijpleidingen voor CO₂, warmtenetten of waterstof en ondergrondse elektriciteitsnetten, heeft meer zekerheid een duidelijke waarde. Voor deze projecten geldt dat de aanlegkosten slechts beperkt samenhangen met de benodigde capaciteit. Het grootste deel van de kosten hangt hierbij namelijk samen met de grondwerkzaamheden. Capaciteitsuitbreiding achteraf is daarmee vergeleken relatief kostbaar, maar als de aangelegde capaciteit te groot blijkt te zijn, betekent het kapitaalvernietiging. Het opstellen van routekaarten, zoals dat momenteel op Europees en nationaal niveau gebeurt, kan helpen een deel van de toekomstonzekerheid weg te nemen en daarmee gerelateerde kosten te verlagen.

7.5 Economische effecten van de transitie en kansen voor Nederland

Waar kosten worden gemaakt, zijn er ook bedrijven en instellingen die er aan verdienen. De transitie beslaat een zo groot deel van de maatschappij dat jaarlijkse investeringen in het beschouwde energiesysteem (ook zonder klimaatbeleid) alleen al in Nederland tientallen miljarden euro per jaar bedragen. Daarbij komt dat de transitie zich uiteraard niet alleen tot Nederland beperkt. Er ligt daarom de uitdaging om op de veranderende omstandigheden in te spelen. In de volgende discussie wordt daarom ingegaan op de mogelijke consequenties van een transitie naar een emissiearm energiesysteem voor energiegerelateerde sectoren in Nederland en de mogelijkheden die de transitie deze sectoren geeft.

Het CBS (2011b) heeft becijferd dat de werkgelegenheid in de hernieuwbare energiesector en energiebesparingssector in 2008 ongeveer 17.300 arbeidsjaren bedroeg, terwijl productie en toegevoegde waarde respectievelijk 5.160 en 1.710 miljoen euro bedroegen. Belangrijke onderdelen van de sector in economische termen zijn energiebesparing en biomassa. De sector droeg in 2008 voor ongeveer 0,32 procent bij aan het bnp, en voor 0,25 procent aan de totale werkgelegenheid. De hernieuwbare

Tabel 7.2

Internationale vergelijking industriebeleid hernieuwbare energie

Indicatoren	Nederland	Duitsland	Frankrijk	Dene- marken	Groot- Brittannië
Historische aanwezigheid van (zware) industrie	0	+	+	-	+
Sterke thuismarkt (vraag)	-	+	0	+	-
Bevolkingsparticipatie / <i>awareness raising</i>	-/0	+	-/0	+	-/0
Stabiel overheidsbeleid	-	+	+	+	0
Investeringsklimaat	+	+	+	0	0
<i>First mover</i> -voordeel	-	+	0	+	-
Nationaal duurzaam energiebeleid op lange termijn	-	+	+	+	0

Bron: Ecorys (2010a,b)

energiesector speelt op dit moment dus nog een zeer bescheiden rol in de Nederlandse economie.

Traditioneel is de energiesector belangrijk voor de Nederlandse economie. Nu wordt deze nog gedomineerd door fossiele brandstoffen. Verwacht wordt dat het aandeel hernieuwbare energie zal gaan toenemen vanwege het Europese streven om de energievoorzieningszekerheid te verbeteren en een transitie te maken naar een koolstofarme economie en samenleving. Er zijn echter meer kansen, zoals bij afvang en opslag van CO₂ of voertuigen op elektromotoren en het gehele systeem eromheen. Dit kan de werkgelegenheid stimuleren en het concurrentievermogen aanjagen.

Met een bedrijvenbeleid voor de energiesector kan de overheid condities creëren waardoor het verdienpotentieel wordt verhoogd en het concurrentievermogen van de sector vergroot. Hiermee kan de groeipotentie van de hernieuwbare energiesector, die als groot wordt geschat (Ecorys 2010a; Roland Berger 2010), beter worden benut. Het Advies Topsector Energie (2011) doet gerichte aanbevelingen voor het aandachtsgebied energie. Uit internationale vergelijkingen blijkt dat het Nederlandse beleid gericht op de ontwikkeling van de duurzame energiesector achterblijft bij de omliggende landen (zie tabel 7.2).

Hierna geven we een kort overzicht van belangrijke punten uit het stimuleringsbeleid zoals dat door de Topsector Energie wordt voorgesteld. Dat beleid is gericht op het vergroten van marktkansen en versterken van het innovatiebeleid. Om de markt zijn werk te kunnen laten doen, zijn heldere randvoorwaarden vanuit de overheid van belang. Voor de periode tot 2020 worden de marktkansen voor de segmenten wind op zee, zon-PV, de gasketen en de bioketen als meest perspectiefvol gezien omdat deze aansluiten bij voor Nederland al sterke economische sectoren, zoals offshore industrie,

halfgeleiderindustrie, agro-industrie en de chemische industrie. De gunstige ligging van Nederland aan zee en de sterke positie van zeehavens spelen hierbij ook een belangrijke rol. Deze segmenten van de energiesector hebben al een sterke internationale positie en de markt waarop ze zich richten, is veel eerder een Europese dan een nationale. Voor de segmenten energiebesparing, wind op land, geothermie en zonnewarmte wordt het stimuleren van vooral de binnenlandse markt belangrijk geacht om het verdienpotentieel te benutten.

Andere segmenten van de duurzame energiesector bevinden zich nog veel meer in de fase van *discovery* en *development*. Met een effectief innovatiebeleid en proeftuin- en demonstratieprojecten kan de overheid ondersteunen dat deze segmenten op middellange termijn marktrijp worden en kunnen gaan bijdragen aan versterking van de Nederlandse economie.

Het Advies Topsector Energie wijst op het grote belang van innovatiebeleid om de concurrentiekracht van de energiesector te versterken. Dit is des te belangrijker bij beschouwing van de kansen voor het Nederlandse bedrijfsleven bij 80 procent emissiereductiepaden naar 2050. Voorbij 2020 zijn er veel onzekerheden over duurzame energietechnologieën en hun economische haalbaarheid, en is er een groot aantal aantal mogelijke inrichtingen van de energiehuishouding. De toekomstige energiehuishouding zal technologisch veel complexer en gevarieerder zijn dan het huidige 'fossiele' systeem. Er zal vanwege het internationale karakter van de energiesector eerder sprake zijn van een Noordwest-Europese dan van een nationale energiehuishouding. Verder onderzoek kan helpen deze complexiteit te ontwarren en daarmee onzekerheden voor het bedrijfsleven te beperken.

De gasrotondestrategie staat centraal in het Nederlandse energiebeleid. Deze strategie is gericht op het optimaal benutten van de Nederlandse delfstoffen, de aanwezige gasinfrastructuur en gastechnologiekennis. In de transitie naar een duurzame energiehuishouding zal gas waarschijnlijk een grote rol blijven spelen vanwege de flexibiliteit die de inzet van gas biedt voor warmte en elektriciteitsproductie. Daarnaast sluit de Nederlandse gasinfrastructuur op een natuurlijke manier aan op groen gas uit biomassa en e-gas uit elektriciteit (waterstof, methaan). Ook kan gas als buffer dienen om pieken en dalen in vraag en aanbod van hernieuwbare energie op te vangen. Een gasrotondestrategie, waarin aardgas, biogas, e-gas en CO₂-transport een belangrijke rol spelen, lijkt dan ook op weg naar 2050 kansen voor het Nederlandse bedrijfsleven te blijven bieden.

De Nederlandse hernieuwbare energiesector bestaat uit relatief veel kleine tot middelgrote bedrijven met een breed scala aan activiteiten. Deze heterogeniteit belemmert het organisatievermogen van de sector, maar kan een voordeel zijn in een situatie waarin veel opties voor de toekomst nog open liggen. Een beleid dat alleen is gericht op de winnaars van nu, kan mogelijkheden belemmeren om op toekomstige

ontwikkelingen te kunnen inspelen, en dus het verdienpotentieel op middellange en lange termijn te benutten.

De rol van beleid in het transitieproces

8.1 Inleiding

In hoofdstuk 6 hebben we implementatie- en leertrajecten op de route naar 2050 schetsmatig ingevuld met stappen die gezet moeten gaan worden. Dat zal niet zomaar vanzelf gebeuren, niet in de laatste plaats door de kosten die daarmee gepaard gaan, zoals we in hoofdstuk 7 hebben laten zien. Met het op gang brengen van de transitie kan echter niet te lang worden gewacht. De mogelijke stappenplannen zoals beschreven in hoofdstuk 6, bevatten ook stappen die op de korte termijn zouden moeten worden gezet, in de periode tot 2020. Alleen dan kan het betreffende deelsysteem substantieel bijdragen aan het halen van het doel in 2050. Er zijn dus op de korte termijn beleidsimpulsen nodig die ervoor zorgen dat die stappen daadwerkelijk worden gezet.

In dit hoofdstuk verkennen we de mogelijkheden voor het beleid om tot een effectieve ondersteuning van de gewenste stappen te komen. Daarbij gaan we in de eerste plaats in op de betekenis van algemene beleidsdoelen (met de ondersteunende beleidsinstrumenten), zoals die voor 2020 zijn neergezet. Daaruit blijkt dat deze kortetermijndoelen en -instrumenten nog geen garantie bieden dat de gewenste acties in gang worden gezet. In dit hoofdstuk geven we daarom een aantal opties voor aanvullend beleid, die er aan zouden kunnen bijdragen dat dat wel gebeurt. Ook belichten we de routekaarten naar 2050 die in de landen om ons heen voor het klimaatbeleid zijn opgesteld. De reden hiervoor is dat energietransitie voor een belangrijk deel ook een internationaal proces is, waarbij afstemming met (of leren van) de buurlanden tot meerwaarde kan leiden.

8.2 Mogelijke beleidsimpulsen

8.2.1 Betekenis van 2020-beleidsdoelen en -instrumenten voor de langetermijntransitie

De doelstellingen en ondersteunende beleidsinstrumenten die in het Europese en Nederlandse beleid voor 2020 zijn vastgesteld, zouden een prima functie kunnen hebben voor de route naar 2050 als ze zouden aanzetten tot de stappen die in het komende decennium nodig zijn. Maar doen ze dat in alle gevallen ook? Geven ze voldoende impuls aan de aangegeven stappen? Of zetten ze wellicht aan tot stappen die juist minder goed passen bij het beeld voor de lange termijn?

De Europese Commissie en de Nederlandse overheid streven ernaar om de beleidsdoelen voor 2020 zo kosteneffectief mogelijk te realiseren. Het *Emission Trading System* (ETS) is erop gericht dat de reducties daar plaatsvinden waar dat het goedkoopst kan – en dat hoeft niet per se in Nederland te zijn. Kosteneffectiviteit is ook een expliciet kenmerk van de nieuwe Subsidieregeling duurzame energie (de SDE+-regeling). Dat streven naar kosteneffectiviteit biedt geen garantie dat de technieken die op de langere termijn nodig zijn tot ontwikkeling komen, omdat de markt binnen de condities zal zoeken naar de oplossingen die relatief het goedkoopst zijn. In de Nederlandse praktijk zijn dat bijvoorbeeld windmolens op land, groen gas uit vergisting, biodiesel uit afvalolie en zuiniger auto's. Op zich zijn dit prima opties, die ook passen in een schoon toekomstbeeld. Ze kunnen daarin echter vanwege hun beperkte potentieel maar een bescheiden bijdrage hebben, onvoldoende om in 2050 een reductie van 80 procent te realiseren. Als met dergelijke opties het gestelde doel voor 2020 bereikt zou kunnen worden, heeft dat als consequentie dat nu nog duurdere technieken die voor de lange termijn van groter belang zijn, geen impuls zouden krijgen voor verdere ontwikkeling. Voorbeelden zijn windmolens op zee, vergassing van biomassa en elektrisch rijden.

Er kunnen bij een sterke focus op kosteneffectieve oplossingen voor de korte termijn zelfs opties in beeld komen waarvan het maar de vraag is of deze op de lange termijn de meest optimale zijn. Voorbeelden zijn micro-warmtekrachtkoppeling (micro-WKK), personenauto's op aardgas, en bij- en meestook van biomassa in kolencentrales. Deze opties zijn voor de korte termijn wel in beeld. Micro-WKK leidt in een toekomstbeeld met een verder CO₂-vrije elektriciteitsproductie echter alleen maar tot extra emissies. Investerings in een aardgasinfrastructuur voor personenauto's hebben in een transitieproces weinig meerwaarde, omdat elektrificatie van meer betekenis is. Bij- en meestook van biomassa in kolencentrales hebben een lage prioriteit als bestemming van biomassa in het eindbeeld, vooral als duurzame biomassa schaars zal zijn. Eventuele toepassing op korte termijn kan wel logistieke en infrastructurele ontwikkelingen rond biomassa verder helpen. Voorkomen moet echter worden dat de introductie van deze technieken nieuwe barrières opwerpt voor de op de lange termijn gewenste ontwikkelingen.

Er kan worden geconcludeerd dat een kosteneffectieve invulling naar 2020 toe niet de zekerheid biedt dat daarmee ook een kosteneffectief pad naar 2050 wordt bewandeld. Er is daarom aanvullend beleid nodig om juist de ontwikkeling van belangrijke innovaties te stimuleren. We geven een aantal opties voor dergelijk beleid.

Meer duidelijkheid over ETS-emissieplafond op de lange termijn

Bij voorkeur wordt zo vroeg mogelijk duidelijkheid gegeven over de ETS-emissieplafonds na 2020, zodat bedrijven daar nu al rekening mee kunnen houden bij hun investeringsbeslissingen. Een voorbeeld is het vaststellen van een bindend tussendoel voor 2030 of 2035. Dat kan voorkomen dat er een te sterke gerichtheid is op het emissieplafond van 2020, wat er toe zou kunnen leiden dat vooral voor de goedkoopste technieken voor de korte termijn wordt gekozen.

Het voordeel van het ETS-systeem is dat het voor alle Europese bedrijven geldt, en dus in ieder geval binnen Europa voor een gelijk speelveld zorgt. Er kan worden nagedacht over mechanismen die de Europese bedrijven beschermen tegen concurrentie van bedrijven uit de rest van de wereld, als voor die bedrijven op dat moment geen gelijkwaardige emissie-eisen gelden. Het systeem biedt ook flexibiliteit in de tijd, wat op zich meer mogelijkheden biedt voor maatregelen die passen bij de lange termijn. De ETS-richtlijn zou zodanig moeten worden aangepast dat bedrijven met grootschalige toepassing van biomassa in combinatie met afvang en opslag van CO₂ worden beloofd voor de negatieve emissies die zij realiseren, bijvoorbeeld doordat zij extra emissierechten op de markt mogen brengen. Deze negatieve emissies kunnen een compensatie zijn voor resterende emissies bij niet-ETS-sectoren, maar dan moet het emissieplafond daarop worden aangepast. Dit betekent dat het emissieplafond in de periode na 2020 in een veel sneller tempo verlaagd moet worden dan nu het geval is (1,74 procent per jaar, op zich al onvoldoende voor 80 procent vermindering).

Meer zekerheid over algemene doelstellingen voor 2030 of 2035 geeft nog geen zekerheid over de CO₂-prijs en daarmee evenmin voor het daadwerkelijk op gang brengen van de implementatie van dure technieken (bijvoorbeeld de contracteringsfase met CO₂-afvang en -opslag). Voor die dure technieken moeten aanvullende instrumenten worden overwogen in de vorm van financiële ondersteuning of normen.

Technologiespecifieke normering of financiële ondersteuning

Technieken die nu nog in de beginfase van hun ontwikkeling zitten, kunnen worden ondersteund met (gesubsidieerde) onderzoeksprogramma's en demonstratieprojecten. Voorbeelden zijn demonstratieprojecten voor elektrisch rijden en voor CO₂-afvang en -opslag, maar ook proefinstallaties voor nieuwe processen bij onderzoeksinstituten. Als verdergaande implementatie voor verdere kostenverlaging van technologieën gewenst wordt geacht, dan kan technologiespecifieke normering (in aanvulling op het ETS) hiervoor een geschikt instrument zijn. Hier wordt meestal tegenin gebracht dat het niet aan de overheid is om keuzen voor specifieke technieken te maken. Het

uitgangspunt daarbij is dat het *picking the winners* aan de markt moet worden overgelaten. Het gaat hierbij echter niet om uiteindelijke *winners*, maar om technieken die in het marktspel geen ontwikkelingskans krijgen en dreigen te verliezen. Dat kan gebeuren als de toepassing een zodanige omvang krijgt, dat subsidie te kostbaar wordt, maar de technieken nog te duur zijn om in de concurrentie met alternatieven een kans te maken (*valley of death*). Technologiespecifieke normering helpt dan een markt te creëren, maar dat moet in die fase wel van beperkte omvang zijn, passend bij het leertraject. De bijmengverplichting van biobrandstoffen van enkele procenten is een voorbeeld dat op zich goed heeft gewerkt, al was de formulering *biobrandstoffen* weer niet specifiek genoeg om de gewenste innovatieve technieken, zoals vergassing van reststromen, een impuls te geven. Er kunnen ook financiële regelingen in het leven worden geroepen waarbij de meerkosten worden verdeeld over iedereen die gebruik maakt van dat type product (zoals feed-in systeem voor elektriciteit). Hierbij is het eveneens van belang een zekere controle te houden op de omvang van de ontwikkeling om de leerkosten te beheersen.

Normstelling of prijsinstrumenten voor niet-ETS-sectoren

Voor de niet-ETS-sectoren (met name huishoudens, verkeer en landbouw) volstaat het niet om het emissieplafond aan te scherpen, aangezien binnen deze sectoren geen systeem van CO₂-emissierechten bestaat. Dit plafond wordt dus niet door de burgers 'gevoeld'. Daarvoor zijn specifieke beleidsinstrumenten nodig. Mocht de huidige Meer-met-Minder- en Blok-voor-Blok-aanpak binnen de gebouwde omgeving op de langere termijn niet leiden tot het verbeteren van gemiddeld 150.000 woningen per jaar, dan zouden andere, meer dwingende beleidsinstrumenten moeten worden ingezet. Daarbij kan worden gedacht aan energienormering voor bestaande woningen (met eventueel fiscale stimulering) of het verhogen van bestaande heffingen op het gebruik van fossiele brandstof. Specifieke normering en prijsinstrumenten zijn tevens opties om elektrisch rijden (of waterstofauto's) of het gebruik van biobrandstoffen binnen het verkeer te stimuleren.

Nieuwe financieringsconstructies

Veel maatregelen in de sfeer van energiebesparing of hernieuwbare energie vragen om hoge investeringen. Dit kan voor minder kapitaalkrachtige bedrijven en burgers een belemmering vormen. Deze belemmering kan worden verkleind door middel van financierings-constructies waarbij een kapitaalkrachtige partij de benodigde investeringen voorfinanciert. Bij voorkeur is dit een marktpartij, bijvoorbeeld een *energy service company* of een energieonderneming die door middel van 'witte certificaten' verplicht wordt energiebesparing bij de afnemers te realiseren. Maar ook de overheid kan hier een rol spelen door bijvoorbeeld een *revolving fund* in te stellen.

Samenwerking tussen onderling afhankelijke partijen

Systeeminnovatie kenmerkt zich door veel veranderingen en onderlinge afhankelijkheden. Enkele voorbeelden. Geen biomassaverwerker zonder het perspectief op voldoende aanbod en geen biomassa-aanbieder zonder perspectief op verwerking.

Daarvoor moeten dan ook transporteurs komen met alle faciliteiten rondom zo'n transportsysteem. Geen afvang van CO₂ zonder bedrijven die CO₂ kunnen transporteren en bedrijven die het willen opslaan. Andersom, geen bedrijven die investeren in opslag zonder garantie op aanbod.

Dergelijke situaties vragen bij uitstek zekerheid over de toekomstige markt, die door de overheid moet worden gecreëerd. Daarnaast kan de overheid (eventueel tijdelijk) in een publiek-private samenwerking meehelpen de uitvoering over de eerste drempels te brengen, bijvoorbeeld als partner bij de inrichting van nieuwe infrastructuur. Ook kan de overheid als regisseur optreden om partijen bij elkaar te brengen.

Vergroten lokale betrokkenheid

Veel van de in dit rapport beschreven systeemopties hebben een grootschalig karakter, met mogelijk ingrijpende consequenties voor de directe leefomgeving van burgers. Voorbeelden zijn wind op land, elektriciteitsnetwerken, kerncentrales en CO₂-afvang en -opslag. Daardoor dreigt het risico dat de burgers zich gaan verzetten tegen de transitie naar een duurzame energievoorziening. Lokale projecten voor opwekking en levering van schone energie kunnen zorgen voor meer betrokkenheid en daardoor wellicht weerstanden verlagen.

Er wordt ook nu al in Nederland veel en enthousiast nagedacht over collectieve initiatieven voor lokale duurzame energieopwekking. Weinig van deze initiatieven zijn tot nu toe tot concrete uitvoering gekomen. Voorbeelden van coöperatieve samenwerkingsverbanden voor lokale energieopwekking waarbij dit wel het geval is zijn: Zeenergie, TexelEnergie, De Windvogel. Beperkte financieringsmogelijkheden en een wetgeving die niet uitgaat van collectieve aanbieders worden als belangrijkste knelpunten ervaren. Als deze knelpunten kunnen worden ondervangen is er, gegeven de energie in de samenleving op dit onderwerp, zicht op substantiële groei van lokale energieopwekking en -levering.

8.2.2 Conclusies

Deze korte inventarisatie signaleert dat een sterke focus op een kosteneffectieve aanpak om de 2020-doelen te halen een risico kan betekenen voor een succesvolle langetermijntransitie. Sommige, mogelijk belangrijke stappen voor de lange termijn worden niet gezet, en in sommige gevallen worden juist stappen gezet die minder goed passen in een langetermijntransitie. Het lijkt daarom van belang om, naast de realisatie van de 2020-doelen, ook aanvullende beleidsdoelen en -instrumenten te formuleren. In het kader van dit rapport is niet onderzocht in hoeverre dat al gebeurt. Bij toekomstige evaluaties van klimaatbeleid zou dit – naast het al dan niet halen van 2020-doelen – wel een belangrijk onderdeel zijn.

De routekaarten die de overheid momenteel uitwerkt, kunnen aangrijpingspunten bieden voor aanvullend beleid. Bij voorkeur vindt de verdere uitwerking in beleid plaats in samenspel tussen de overheid en de maatschappelijke sectoren. Het is daarbij goed

om te bedenken dat veel van de technologische ontwikkelingstrajecten een internationaal karakter hebben, waarbij Nederland niet in alle gevallen een trekkende rol hoeft te hebben. Er kunnen speerpunten worden gekozen. Voor andere technieken kan een afwachtender houding passen tot de resultaten van leertrajecten in het buitenland beschikbaar komen. Daarbij moet worden afgewogen in hoeverre het voor de toekomstige snelheid van een mogelijke introductie in Nederland van belang is om al op korte termijn ervaring met een nieuwe techniek op te doen. Het leren over de inpassing in een systeem en het onderhoud van de techniek moet immers ook in Nederland gebeuren.

Veel van de mogelijke instrumenten komen op dit moment wellicht als (te) ingrijpend over. Maar het realiseren van het klimaatdoel voor 2050 vraagt dan ook om een forse inspanning, die niet 'vanzelf' door de samenleving geleverd zal worden. Feit is dat een schoon energiesysteem vooralsnog duurder is dan een fossiel systeem, en dat – als er niet wordt gekozen voor financiële ondersteuning van grootschalige uitrol van schone technieken – er gekozen moet worden voor andere, meer dwingende instrumenten. Dat zal niet één specifiek instrument zijn. Het ligt voor de hand uit de aangegeven beleidsopties een samenhangend en op innovatie gericht pakket te ontwerpen.

8.3 Routekaarten in de omliggende landen

Het Nederlandse energie- en klimaatbeleid is ingebed in dat van Europa. Europese regelgeving op velerlei gebied schept randvoorwaarden voor Nederlandse activiteiten. Daarnaast is Nederland in het bijzonder bij de gas- en elektriciteitsvoorziening nauw aan omliggende landen gekoppeld.

Vooral inzake elektriciteit hebben omliggende landen hoge ambities en zijn er instrumenten gericht op verduurzaming ontwikkeld of in ontwikkeling. Het is daarom nuttig hier een blik op te werpen om te zien welke perspectieven en inspiratie dit voor het Nederlandse beleid zou kunnen bieden. We spitsen dit korte overzicht – gebaseerd op Boot (2011) – toe op het Verenigd Koninkrijk, Duitsland en Denemarken (zie tabel 8.1). België heeft geen helder beleid wegens het ontbreken van een regering. Het Franse beleid is sterk bepaald door het feit dat de elektriciteitsvoorziening grotendeels is gebaseerd op kernenergie en komt daarom minder in aanmerking als inspiratiebron voor Nederlands beleid.

De belangrijkste drijvende krachten hebben in de verschillende landen andere accenten, maar het scheppen van industriële kansen en overwegingen om klimaatverandering te verminderen komen overal terug, zij het in verschillende volgorde. Nederland let wat sterker op kosten, Denemarken op voorzieningszekerheid en het beleid in Duitsland heeft een sterkere ethische inslag. Dit verklaart mede de abrupte wijzigingen van het Duitse beleid ten aanzien van kernenergie.

Tabel 8.1

Langtermijnambities en beleid in Verenigd Koninkrijk, Duitsland en Denemarken

	Verenigd Koninkrijk	Duitsland	Denemarken
Belangrijkste overwegingen	1. Klimaat 2. Kosten 3. Industriële kansen	1. Ethiek 2. Klimaat 3. Industriële kansen	1. Voorzieningszekerheid 2. Klimaat 3. Industriële kansen
Hoofddoel 2030	CO ₂ -60% Elektriciteit volledig CO ₂ -vrij	30% hernieuwbare energie CO ₂ -55%	-
Andere ambities 2030	Hernieuwbare energie 30%	Hernieuwbare elektriciteit 50%	100% hernieuwbare elektriciteit en warmte
Ambities 2050	80% broeikasgasreductie (wettelijk bindend)	Minimaal 80% broeikasgasreductie 60% hernieuwbaar (80% van elektriciteit, 10% CCS, rest piekvermogen)	100% hernieuwbaar, waarvan 60-80% wind Geen fossiel -75% broeikasgasemissie in energiesysteem
Illustratieve aandelen elektriciteit in 2030	40% hernieuwbaar, 40% kern, 15% CCS, 10% overig gas (afhankelijk van kosten)	Geen kern na 2021, 50% hernieuwbaar, CCS, gas/WKK	Elektrificatie: elektriciteit 40-70% van totale energievraag: 45% wind, 20% warmtepompen en zon, 35% biomassa
Beleid	Wettelijk bindende 'carbon budgets'; sterke stimulansen voor offshore wind; aanpassing ruimtelijke ordening voor wind op land; green deal voor efficiency	Decentralisatie, monitoring, nationale dialoog, meer R&D, meer bevoegdheden ten behoeve van hoogspanningsnetten, ruimtelijke ordening, wind op land	Brandstofbelasting; verplichting hernieuwbare brandstoffen in stadsverwarming
Nieuwe beleidsinstrumenten in overweging	CO ₂ minimum prijs, 'contracts for differences', capaciteitsmarkt, Green Investment Bank	Geen heldere voornemens Capaciteitsmarkt en klimaatwet in overweging, wellicht stimulators voor elektriciteitsopslag	Sterke verhoging energiebelasting fossiel

Belangrijker zijn de verschillen in het beleidsinstrumentarium. Hierbij valt vooral het beleid in het Verenigd Koninkrijk op. Het energiebeleid is hier gebaseerd op de Klimaatwet van 2008. De belangrijkste elementen daarvan zijn:

- Een wettelijk bindend reductiedoel van 80 procent vermindering van broeikasgasuitstoot in 2050.

- De instelling van een Commission on Climate Change, die de regering adviseert over de instelling van specifieke vijfjaarlijkse 'carbon budgets' en hoe die te verwezenlijken.
- Een kader hoe en wanneer de regering op dit advies moet reageren.
- De Commission on Climate Change adviseerde al over vier carbon budgets tot 2023-27 en de regering nam deze adviezen grotendeels over. Belangrijke elementen daarvan zijn de stelling dat broeikasgasreducties in het elektriciteitssysteem goedkoper zijn dan elders in de economie en het niet mogelijk is te lang met sterke reducties te wachten, omdat anders de 80 procent niet verwezenlijkt kan worden. De Engelse regering stelt ook dat het duurder is om lang met stevige acties te wachten dan daar nu op in te zetten. Kosteneffectiviteit is een belangrijke overweging van het Engelse beleid en men is ervan overtuigd dat kernenergie relatief goedkoop is. Daarom vormt bevordering van kernenergie een belangrijk onderdeel van het klimaat- en energiebeleid voor de lange termijn. Offshore wind is het centrale onderdeel van de bevordering van hernieuwbare energie. Ten slotte wordt veel aandacht en geld gestoken in de bevordering van CO₂-afvang en -opslag.

In theorie zou een aanscherping van het emissiehandelsplafond voor CO₂ in de elektriciteitsvoorziening en industrie voor de realisering van het CO₂-doel op de lange termijn kunnen zorgen. De Britse regering is er echter van overtuigd dat dit niet voldoende is en dat aanvullende instrumenten nodig zijn. Overweging daarbij is vooral dat niet is te verwachten dat de wisselende CO₂-prijs voldoende zekerheid geeft voor de enorme kapitaalinvesteringen die nu voor een schone elektriciteitsvoorziening nodig zijn, vergeleken met het alternatief van minder kapitaalintensieve gascentrales of het in het geheel uitblijven van capaciteitsuitbreiding; daarnaast zullen de elektriciteitsprijzen naar verwachting veel minder stabiel worden, wat ook de kapitaalintensieve investeringen bemoeilijkt. In juli werd de *Electricity Market Reform* gepubliceerd, die uit vier elementen bestaat:

- Vanaf april 2013 zal een nationale CO₂-prijsvloer worden geïntroduceerd, olopend van in beginsel 15,70 pond/ton CO₂ (18 euro), naar 30 pond/ton CO₂ in 2020 en 70 in 2030 (in reële prijzen van 2009).
- De introductie van *Feed in Tariffs* met *Contracts for Differences* (FiT CfD) vanaf 2014 voor hernieuwbare elektriciteitsproductie, kernenergie en CCS. De FiT CfD is een in Europa nog niet bestaand instrument. In wezen is het een financieel contract voor de lange termijn, dat stabiele opbrengsten garandeert voor CO₂-arme elektriciteitsproductie. Voor in het bijzonder windenergie en kernenergie lijkt het enigszins op de SDE+ met een gegarandeerde opbrengst als de marktprijs onder een vooraf bepaalde *strike price* ligt die weer wordt terugbetaald als de marktprijs daarboven komt. Voor CCS is dat weer enigszins anders vormgegeven.
- Een capaciteitsmechanisme. Twee opties worden hierbij nog gezien. Een is om uit te gaan van een strategische capaciteitsreserve. De ander is om een marktmechanisme in te voeren dat gegarandeerde capaciteit (of vraagreductie) voor langere termijn biedt, vergelijkbaar met het systeem in het noordoosten van de Verenigde Staten. De regering verwacht tegen het jaareinde hierover een beslissing te nemen. Hierbij

bestaat uiteraard een nauw verband tussen de te bepalen details van de FiT CfD en het in te voeren capaciteitsmechanisme.

- Een *Emissions Performance Standard* (EPS) die aanvankelijk bepaald wordt op 450 g CO₂/kWh voor nieuwe elektriciteitscentrales en aanzienlijke verbeteringen van bestaande centrales. De standaard zal niet gelden met terugwerkende kracht. De hoogte van de EPS wordt periodiek herzien. De initiële waarde maakt het onmogelijk kolencentrales zonder een deel CCS of zonder aanzienlijke bijstook van biomassa te bouwen. Voorzien wordt dat de norm geleidelijk omlaag zal gaan en daarmee een sluitstuk vormt van de bevordering van schone elektriciteitsvoorziening, naast de eerder genoemde marktgeoriënteerde instrumenten.

De Britse regering moet nog veel details invullen, maar nu al is duidelijk dat de *Electricity Market Reform* – zoals ook de Europese elektriciteitsmarkt in wezen werd gebaseerd op Britse inzichten en voorbeelden – in beginsel een belangrijke nieuwe ontwikkeling is. De kortetermijnvraag is uiteraard of individuele landen zo'n eigen weg kunnen gaan. Door de relatief beperkte interconnectiecapaciteit heeft het Verenigd Koninkrijk hier meer speelruimte dan een land als Nederland. Maar ook dan zal het directe betekenis kunnen hebben. Bij een beperkt investeringsbudget van grote internationale ondernemingen als EdF, E.ON of RWE is bijvoorbeeld evident dat de beslissing om een kerncentrale ergens in Europa te bouwen, beïnvloed gaat worden door de Britse ondersteuning.

Opmerkelijk is dat de andere landen hun verre gaande ambities nog niet vergezeld hebben laten gaan van een doordacht nieuw beleidsinstrumentarium. Denemarken vertrouwt op een verre gaande aanpassing van de energiebelasting die steeds zwaarder op fossiele brandstoffen zal drukken. Duitsland is nog in de fase waarin wordt bezien wat de beëindiging van kernenergie nu precies voor de energievoorziening betekent. Ook de te zetten stappen na 2020 zijn er nog weinig uitgewerkt. Voor de hand ligt dat gas een belangrijker rol gaat spelen dan aanvankelijk in Duitsland gedacht. Dat is een steun in de rug voor de Nederlandse ambities een gasrotonde te vormen, maar maakt het ook belangrijker een beeld te ontwikkelen hoe gas in een duurzaam energiesysteem past. Ook zal afbouw van productiecapaciteit in Duitsland de mogelijke positie van Nederland als exporteur van elektriciteit aannemelijker maken.

Literatuur

- Advies Topsector Energie (2011) Veer, J. van der, T. van der Hagen, F. Pentinga & B. de Vries, *Energie in beweging*.
- AgentschapNI (2010) *Energieneutraal Bouwen, hoe doe je dat?*, Agentschap NI, Utrecht.
- Boot, P. (2011) 'Energy transitions in Northwest Europe: different views, no coordination yet', in P. Boonekamp & H. de Coninck, *Energy: inspiration for the future*, te verschijnen.
- Broek, M. van den, A. Ramirez, H. Groenenberg, F. Neele, P. Viebahn, W. Turkenburg & A. Faaij (2010), 'Feasibility of storing CO₂ in the Utsira formation as part of a long term Dutch CCS strategy', *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4: 351-366.
- Carbon Recycling (2011) www.carbonrecycling.is, 5-9-2011.
- CBS 2009, *Webmagazine* 22 juni 2009.
- CBS (2010) Poelman, B. & C. van Duin, *Bevolkingsprognose 2009-2060*, Centraal Bureau voor de Statistiek, Den Haag/Heerlen.
- CBS (2011a) *Hernieuwbare energie in Nederland*, Centraal Bureau voor de Statistiek, Den Haag.
- CBS (2011b) *Economische radar duurzame energiesector. De aanbodzijde belicht van de economie achter de hernieuwbare energie en energiebesparing. Een nulmeting voor werkgelegenheid, productie, toegevoegde waarde, internationale handel, investeringen en innovatie*, Centraal Bureau voor de Statistiek, Den Haag.
- CE (2002) Essen, H. van & J. Dings, *Towards a more sustainable transport indicator. Critical assessment of the modal split as an indicator for the EU Sustainability Strategy*, CE Delft.
- CE (2009) *IPO Routekaart Warmte, Provincies op weg naar effectieve benutting van warmte en koude*, CE Delft.
- CE (2010) Rooijers, F.J., C. Leguijt & M.I. Groot, *Halvering CO₂-emissie in de gebouwde omgeving, een beoordeling van negen instrumenten*, CE Delft.
- CLM (2008) Vlaar, L.N.C., P.C. Leendertse, A. Kool & B. Luske, *Emissiereductie van broeikasgassen in open teelten, ontwikkeling van een klimaatmodule voor het Milieukeurschema Plantaardige Producten*, CLM Onderzoek en Advies, Culemborg en Blonk Milieu Advies, Gouda.
- Creative Energy (2008) *Action Plan Process Intensification*, Creative Energy, Energy Transition.
- Creatieve Energie (2010) *Elektriciteitsbesparing: urgent action required!*, Creatieve Energie, Energietransitie.
- D-Cision (2010) *Ontwikkeling van de brandstofmix van de Nederlandse elektriciteitsvoorziening - Analyse en synthese van recente studies*, D-Cision B.V., Zwolle.
- Dornburg, V., D.P. van Vuuren, G. van de Ven, H. Langeveld, M. Meeusen, M Banse, M. van Oorschot, J. Ros, G. J. van den Born, H. Aiking, M. Londo, H. Mozaffarian, P. Verweij, E. Lyseng & A. Faaij (2010) 'Bioenergy revisited: Key factors in global potentials of bioenergy', *Energy & Environmental Science* 3: 258-267.

- EBN/Gasunie (2010) *CO₂-transport- en opslagstrategie*, EBN/Gasunie advies, Utrecht/ Groningen.
- EC (2009a) *Regulation (EC) No 443/2009 of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 setting emission performance standards for new passenger cars as part of the Community's integrated approach to reduce CO₂ emissions from light-duty vehicles*, Brussel.
- EC (2009b) *Directive 2009/28/ec of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC*, Brussel.
- EC (2009c) *Ontwikkeling van de internationale dimensie van het geïntegreerd maritiem beleid van de Europese Unie*, Europese Commissie, Brussel.
- EC (2010) *EUROPA 2020. Een strategie voor slimme, duurzame en inclusieve groei*, (COM(2010)2020), Brussel.
- EC (2011a) *Een routekaart naar een concurrerende koolstofarme economie in 2050*, COM(2011)112, Brussel.
- EC (2011b) *Voorstel voor een richtlijn van het Europees Parlement en de Raad betreffende energie-efficiëntie en houdende intrekking van de Richtlijnen 2004/8/EG en 2006/32/EG*, COM(2011)370, Brussel.
- ECF (2010) *Roadmap 2050. A Practical Guide to a Prosperous Low-Carbon Europe, Technical Analysis*, European Climate Foundation.
- ECN (2006) Daniëls, B.W., A.W.N. van Dril, Y.H.A. Boerakker, P. Godfroij, F. van der Hilst, P. Kroon, M. Menkveld, A.J. Seebregts, C. Tigchelaar & H.P.J. de Wilde, *Instrumenten voor energiebesparing - Instrumenteerbaarheid van 2% besparing per jaar*, ECN-E-06-057, Petten.
- ECN (2009a) Gerdes, J. & P.G.M. Boonekamp, *Energiebesparing in Nederland 1995-2007, Inclusief decompositie energieverbruikstrend*, ECN-E-09-040, Petten.
- ECN (2009b) Hanschke, C.B. et al., *Duurzame innovatie in het wegverkeer. Een evaluatie van vier transitiepaden voor het thema Duurzame Mobiliteit*, ECN-E-08-076, Petten.
- ECN (2009c) *Passieffhuis en EPN, Onderzoek naar de waardering van passieffhuizen volgens EPN en PHPP*, Boer, B.J. de, I. Kondratenko, D. Jansen, L. Joosten & C. Boonstra, ECN-E-09-054, Petten.
- ECN (2009d) Seebregts, A.J., H.J.M. Snoep, J. van Deurzen, S.M. Lensink, A.J. van der Welle & W. Wetzels, *Brandstofmix elektriciteit 2020: Inventarisatie, mogelijke problemen en oplossingsrichtingen*, ECN-E-09-046, Petten.
- ECN (2010a) Seebregts, A.J., H.J.M. Snoep, J. Van Deurzen, P. Lako & A.D. Poley, *Kernenergie & Brandstofmix, Effecten van nieuwe kerncentrales na 2020 in de kernenergiescenario's uit het Energierapport 2008*, ECN-E-10-033, Petten.
- ECN (2010b) Schoots, K., *Innovatie en leercurven. Rapportage naar aanleiding van kennisvragen werkgroep energie en klimaat*, ECN-E-0-038, Petten.
- ECN (2010c) Smekens, K.E.L. (coörd.), *Actualisatie Optiedocument 2009, Opties voor het verminderen van broeikasgasemissies, energiegebruik en luchtverontreiniging*, ECN-E-10-011, Petten.
- ECN (2011a) Cameron, L.R., *Scenarios for offshore wind including spatial interactions and grid issues*, ECN-E-11-049, Petten.

- ECN (2011b) Wetzels, W., I. Blezer & J.M. Sipma, *Beleidsstudie naar WKK- en warmtepomptechnologieën*, ECN-E-10-096, Petten.
- ECN (2011c) *Beleidsstudie naar WKK- en warmtepomptechnologieën*, ECN-E-10-096, Petten.
- ECN/PBL (2010) *Referentieraming energie en emissies 2010-2020*, ECN-E-10-004, Petten/Den Haag.
- Ecofys (2009) Hoogwijk, M., K. Klomp, K. Blok & M. van Elburg, *Mogelijkheden voor additioneel beleid apparaten*, Ecofys, Utrecht.
- Ecorys (2010a) *Versterking van de Nederlandse duurzame energiesector*, draft 19 nov 2010.
- Ecorys (2010b) *Assessment of non-cost barriers to renewable energy growth in EU Member States*, AEON, Rotterdam.
- European Parliament (2008) *Outlook of Energy Storage Technologies*, Policy Department Economic and Scientific Policy, Brussel.
- Europipe (2010) *Development of a large-scale CO₂ transport infrastructure in Europe: matching captured volumes and storage availability*, CO₂Europipe, Utrecht.
- Fenco (2010) *Analysis of potentials and costs of CO₂ storage in the Utsira aquifer in the North Sea, Final Report for the FENCO ERA-NET project*.
- Gezondheidsraad (2001) *Voedingsnormen energie, eiwitten, vetten en verteerbare koolhydraten, advies aan de Minister van VWS*, Den Haag.
- Harmelink, M., W. Graus, M. Marsidi, D. Saygin & E. Worrell (2010) *Potentieel voor Besparing en Efficiency van Energiegebruik in Nederland (BEEN)*, Achtergronddocumentatie, Universiteit Utrecht, Ecofys, Harmelink Consulting, Utrecht.
- Heide, D., L. von Bremen, M. Greiner, C. Hoffmann, M. Speckmann & S. Bofinger (2010), 'Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future, highly renewable Europe', *Renewable Energy* 35: 2483-2489.
- Hoogwijk, M., A. Faaij, B. de Vries & W. Turkenburg (2008) *Exploration of regional and global cost-supply curves of biomass energy from short-rotation crops at abandoned cropland and rest land under four IPCC SRES land-use scenarios*, Biomass and Bioenergy doi:10.1016/j.biombioe.2008.04.005.
- Hout, M. van (2011) *Analysing the impacts of high shares of intermittent generation in the future EU20 electricity network: towards an integrated European electricity network*, VU, Amsterdam.
- IEA (2007) *Potential Contribution of Bioenergy to the World's Future Energy Demand*, IEA Bioenergy ExCo:2007:02, International Energy Agency, Paris.
- IEA (2008) *Energy Technology Perspectives, In support of the G8 Plan of Action, Scenarios & Strategies to 2050*, pp. 409-413, International Energy Agency, Paris.
- IEA (2009a) *Transport Energy and CO₂: Moving towards sustainability*, International Energy Agency, Paris.
- IEA (2009b) *Energy technology transitions for industry, Strategies for the next industrial revolution*, International Energy Agency, Paris.
- IEA (2010), *Energy Technology Perspectives 2010, Scenarios & Strategies to 2050*, International Energy Agency, Paris.
- IenM (2011a) *Toelichting bij brief van de minister van I&M betreffende voorhang Besluit bodemenergiesystemen 17 maart 2011*, Den Haag.
- IenM, (2011b) *Brief aan IPO betreffende windenergie op land*, d.d. 17 mei 2011, Den Haag.

- IF (2011) *Diepe geothermie 2050, een visie voor 20% duurzame energie voor Nederland*, IF Technology/Ecofys/TNO Arnhem.
- IPCC (2011) *Special report on renewable energy sources and climate change mitigation*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group III.
- KaE (2009) *Het Nieuwe Telen. In 7 stappen naar ruim 50% energiebesparing, programma Kas als Energiebron*.
- KiM (2008a) Jorritsma, P., *Substitutiemogelijkheden luchtverkeer-hogesnelheidstrein*, Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid, Den Haag.
- KiM (2008b) Groot, W., *Second opinion op studie 'Geforceerde Modal Shift'*, Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid, Den Haag.
- KiM (2011) *Naar een duurzaam wegverkeerssysteem in 2050*, te verschijnen.
- KWR (2010) *Ordering van de ondergrond, een fysiek en juridisch afwegingskader (bijlagenrapport)*, KWR watercycle research institute, Nieuwegein.
- LEI (2008) *Duurzame energie: stroomt het? Managementsamenvatting over de belemmeringen in wet- en regelgeving en vergunningverlening bij de implementatie van duurzame energiesystemen in de glastuinbouw*, LEI/WUR, Wageningen.
- Lindeberg, E., J.F. Vuillaume & A. Ghaderi (2009) Determination of the CO₂ storage capacity of the Utsira formation, *Energy Procedia* 1, 2777–2784.
- MNP (2007) Stolwijk, H., H. Westhoek & J. van Dam, *Analyse van het burgerinitiatief 'Boeren met toekomst', Effecten van een andere intensieve veehouderij*, MNP-publicatienummer 500139001, Milieu- en Natuurplanbureau (MNP), Bilthoven.
- MUConsult (2007) *Substitutiemogelijkheden luchtverkeer, achtergrondrapportage*, Amersfoort.
- NEA (2003) *Scenarios, Traffic Forecasts and Analysis of Corridors on the Trans-European Network*, ETUIB5-7000A-512.346797, Zoetermeer.
- Nijland, H. (2009) 'Wat kan fietsbeleid betekenen voor het klimaatbeleid?', *Milieu* 15 (3): 17-19.
- OECD/NEA (2011) *Technical and economic aspects of load following with nuclear power plants*, Nuclear Energy Agency (Organisation for Economic Co-operation and Development), Paris.
- PBL (2009) Nagelhout, D. & J. Ros, *Elektrisch autorijden. Evaluatie van transitie op basis van systeemopties*, Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag/Bilthoven.
- PBL (2010) *Leefomgevingsbalans 2010*, Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag/Bilthoven.
- PBL (2011a) VESTA: *ruimtelijk energiemodel voor de gebouwde omgeving. Data en methoden*, Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag/Bilthoven, te verschijnen.
- PBL (2011b) Westhoek, H., T. Rood, M. van de Berg, J. Janse, D. Nijdam, M. Reudink & E. Stehfest, *The Protein Puzzle*, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague/Bilthoven.
- PBL (2011c) Born, G.J. van der, 'Emissiereductie veenweide in 2050', interne PBL-notitie, Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag/Bilthoven.
- PRC (2007) *Onderzoek naar de effecten van een geforceerde modal shift*, Policy Research Corporation, Rotterdam.

- Regmi, A. (ed.) & M. Gehlhar (2001) *Changing Structure of Global Food Consumption and Trade*, Market and Trade Economics Division, Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture, Agriculture and Trade Report. WRS-01-1.
- Rijksoverheid (2009) *Nationaal Waterplan 2009-2015*, Den Haag.
- RIVM (2011) *Het presteren van mechanische ventilatiesystemen in nieuwbouw en eengezinswoningen*, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven.
- Roland Berger Strategy Consultants (2010) *Stimulering van de economische potentie van duurzame energie voor Nederland*, Amsterdam.
- SenterNovem (2009) Koppejan, J., W. Elbersen, M. Meeusen & P. Bindraban, *Beschikbaarheid van Nederlandse biomassa voor elektriciteit en warmte in 2020*, SenterNovem, Utrecht.
- Shell (2011) *Signals & Signposts, Shell energy scenarios to 2050*, Shell International BV.
- SRU (2011) *Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung*, Sachverständigenrat für Umweltfragen, Berlin.
- Sterner, M. (2009) *Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems. Limiting global warming by transforming energy systems*, Renewable energies and Energy Efficiency 14, Kassel University Press.
- Tennet (2008) *Visie 2030*, Tennet, Arnhem.
- VHK (2008) *Elektrische apparatuur in Nederlandse huishoudens - Overzicht 1980-2005 Scenario's 2010-2020*, Van Holsteijn en Kemna, Delft.
- Vleeming, H., E. van der Pol, J. Varwijk & P. Hinderink (2009) *Mogelijkheden tot energiebesparing in de Nederlandse energie-intensieve industrie*, Process Design Center, Breda.
- VNMI/AVNeG (2011) *Rapportage Routekaart metallurgische industrie en gieterijen*, Vereniging Nederlandse Metallurgische Industrie (VNMI) en Algemene Vereniging van Nederlandse Gieterijen (AVNeG), Zoetermeer.
- VROM (2010) *Ruimtelijk Perspectief Windenergie op Land*, Concept van 3 februari 2010, Den Haag.
- Vuuren, D.P. van, E. Bellevrat, A. Kitous & M. Isaac (2010) 'Bio-Energy Use and Low Stabilization Scenarios', *The Energy Journal* 31, Special Issue 1, The Economics of Low Stabilization.
- WBGU (2009) *World in Transition - Future Bioenergy and Sustainable Land Use*, Flagship Report 2008, WBGU-German Council on Global Change, Berlin.
- WUR (2010) Elbersen, W., B. Janssens & J. Koppejan, *De beschikbaarheid van biomassa voor energie in de Agro-industrie*, Rapport 1200 Wageningen UR Food & Biobased Research, Wageningen.
- WUR (2007) Spijker, J.H., H.W. Elbersen, J.J. de Jong, C.A. van den Berg & C.M. Niemeijer, *Biomassa voor energie uit de Nederlandse natuur, een inventarisatie van hoeveelheden, potenties en knelpunten*, Alterra-rapport 1616, Alterra, Wageningen.
- Wuppertal Institut (2011) *Persoonlijke mededeling van Stefan Lechtenböhmer*, Wuppertal Institut, Wuppertal.
- WWF (2011) *The energy report, 100% renewable energy by 2050*. WWF.
- Zwaan, B. van der, R. Rivera-Tinoco, S. Lensink & P. van den Oosterkamp (2011) *Evolving Economics of Offshore Wind Power: Cost Reductions from Scaling and Learning*, Amsterdam.

De broeikasgasuitstoot van Nederland en andere westerse landen moet in 2050 zijn afgenomen met meer dan 80 procent. Alleen dan kunnen de gevolgen van de klimaatverandering worden beperkt tot een acceptabel niveau.

Nederland kan daarin slagen, mits het inzet op een mix van energiebesparing; biomassa, CO₂-opvang en -opslag; en schone elektriciteit. Het is zaak de daarvoor benodigde innovatieve technologie op korte termijn verder te ontwikkelen en in de praktijk in te passen.

Dit rapport verkent de routes naar een ander, schoner energiesysteem in 2050. Het beschrijft daarbij de rol van specifieke technieken, en schetst de belangrijke stappen die op korte termijn moeten worden gezet.

Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN)

Postadres
Postbus 1
1755 ZG Petten
T +31 (0)224564949

www.ecn.nl

Planbureau voor de Leefomgeving

Postadres
Postbus 30314
2500 GH Den Haag

Bezoekadres
Oranjevuitensingel 6
2511 VE Den Haag
T +31 (0)70 3288700

www.pbl.nl

November 2011