



Energieonderzoek Centrum Nederland



De belofte van een duurzame Europese energiehuishouding

Energievisie van ECN en NRG

Augustus 2007





Energievisie van ECN en NRG



De belofte van een duurzame Europese energiehuishouding

Energievisie van ECN en NRG

M.A. Uyterlinde

J.R. Ybema

R.W. van den Brink

Verantwoording

Dit rapport is tot stand gekomen onder begeleiding van de Transitiedenk tank van ECN/NRG, waarin zitting hebben: A.B.M. Hoff, C.A.M. van der Klein (directie ECN), A.M. Versteegh (directie NRG), J.R. Ybema, R.W. van den Brink, F. J. Blom, F.O. Lenzmann, M.A. Uytterlinde (coördinatie).

Naast de hoofdauteurs hebben de volgende medewerkers aan het rapport bijgedragen. De modelberekeningen zijn uitgevoerd door H. Rösler (ECN). Hoofdstuk 6.1 is geschreven door F.J. Blom (NRG). Verder zijn bijdragen geleverd door M.J.J. Scheepers, H. Jeeninga, P. Kroon en L.W.M. Beurskens (ECN) en S. de Groot (NRG).

De auteurs bedanken de externe reviewers Noé van Hulst (IEA) en Marc Steen (JRC), de leden van de ECN/NRG klankbordgroep en diverse andere medewerkers binnen ECN en NRG voor hun kritische en constructieve inbreng.

Abstract

Energy policy is facing some major challenges. Industrial countries are increasingly dependent on imports of oil and gas, and global warming becomes more and more likely. In order to address these challenges, a sustainable energy system needs to be developed. This document contains an outline of such a sustainable energy situation for Europe in the year 2050. Research institutes ECN and NRG present such a vision because it may guide energy research, and inspire both businesses and governments.

The authors draw a consistent development path, leading to 60% lower CO₂ emissions in Europe (in comparison to 1990) and a significantly reduced level of oil and gas imports. In 2050 the energy system will not be completely sustainable. For nuclear energy, carbon capture and storage, and biomass, additional sustainability conditions are formulated for their credible use in a sustainable energy system. If these resources comply with these conditions, the overall picture will meet realistic criteria of sustainability. Additionally, continued energy conservation and further development of renewables should be pursued after 2050.

In the vision for 2050, much weight has been given to new technologies, new resources and new energy infrastructure; in addition to these, new ways of decision making and new patterns of behaviour are essential. With respect to technological development, leading for instance to cost effective solar cells, the deployment of second generation biofuels and reliable carbon capture and storage, realistic judgements have been made as to the timing of their commercialisation. The technology policy required to bring about such technological developments is briefly outlined.



Inhoud

Samenvatting	4
Voorwoord	5
1. Inleiding	6
2. Beeld van een duurzame energiehuishouding in 2050	8
2.1 Hoofdlijnen	8
2.2 Gebouwde omgeving	8
2.3 Transportsector	10
2.4 Industrie	12
2.5 Elektriciteitsopwekking en -distributie	13
3. Waarom dit beeld van een duurzame energiehuishouding?	16
3.1 Schone energie is een basisbehoefte in 2050	16
3.2 Criteria voor duurzaamheid	21
4. Hoe kan een duurzame energiehuishouding er komen?	24
5. Strategie-lessen	28
5.1 Het kan ook anders lopen	28
5.2 Wat betekent dit voor technologie-onderzoek?	29
5.3 Kosten en baten	32
6. Duurzaamheidscriteria voor kernenergie, CO ₂ -opslag en biomassa	34
6.1 Kernenergie	34
6.2 Kolen met CO ₂ -afvang en -opslag	37
6.3 Biomassa	38
Referenties	41
Lijst van tabellen / Lijst van figuren	42
Bijlage Aannames voor kwantitatieve onderbouwing	43

Samenvatting

Het gaat niet goed met de energiehuishouding. Industrielanden raken steeds meer afhankelijk van importen van olie en aardgas, en de opwarming van de aarde gaat door. Om aan deze bedreigingen het hoofd te bieden is de ontwikkeling van een duurzame energiehuishouding noodzakelijk. In dit document wordt een beeld van een duurzamere energiehuishouding in Europa geschetst voor het jaar 2050. Onderzoeksinstituten ECN en NRG formuleren deze visie omdat deze richtinggevend is voor het energieonderzoek en als inspiratie kan dienen voor bedrijven en overheden.

In 2050 zijn hernieuwbare energiebronnen goed voor meer dan 35% van de energievoorziening, met een flinke rol voor biomassa, windenergie en zon. Er is ook sterk ingezet op energiebesparing. Kernenergie wordt beperkt toegepast, omdat slechts in ongeveer de helft van de EU lidstaten steun is voor kernenergie. Kolen met CO₂-opslag worden grootschalig ingezet voor de productie van zowel elektriciteit als waterstof. Deze waterstof wordt in de transportsector gebruikt. Biomassa wordt vooral toegepast als brandstof voor vrachtverkeer, scheepvaart en luchtvaart, omdat er in deze sectoren weinig andere alternatieven voor olieproducten zijn. De energievraag van woningen en gebouwen is sterk verminderd, en wordt voornamelijk ingevuld met zonne-energie en elektriciteit.

De opstellers hebben beoogd een consistente ontwikkeling te schetsen die leidt tot een 60% lagere uitstoot van CO₂ in Europa (vergeleken met 1990) en een aanzienlijk lagere import van olie en gas. In 2050 zal de energiehuishouding nog niet geheel duurzaam zijn, en er zullen nog steeds mogelijkheden bestaan voor verdere energiebesparing en ontwikkeling van hernieuwbare energiebronnen.

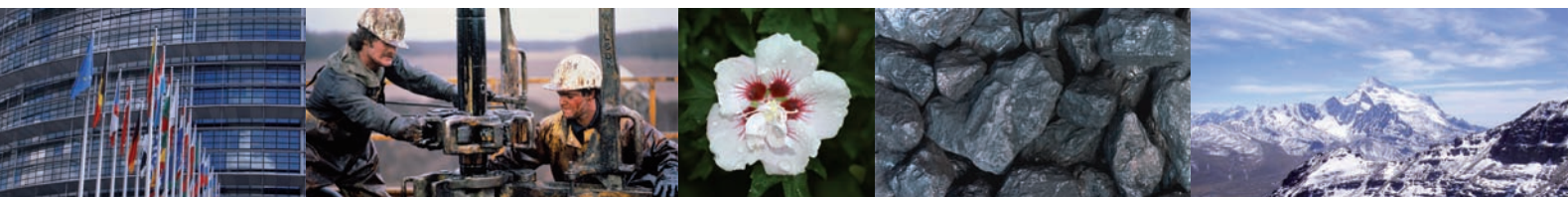
Wel kunnen de grote knelpunten van de energievoorziening in 2007 zijn weggenomen.

Voor het realiseren van een duurzame energiehuishouding zal consistent en slagvaardig beleid nodig zijn, waarbij gezocht wordt naar een goede samenwerking tussen overheden, bedrijven en burgers. Op tijd beginnen is belangrijk, want de tijdsconstanten van de energievoorziening zijn lang en het kost tijd voordat een nieuwe technologie volwassen en concurrerend is geworden. Het is ook belangrijk dat de private sector kan opereren in een helder en stabiel beleidskader dat de goede prijssignalen uitzendt.

In het beeld van 2050 ligt de nadruk op toepassing van nieuwe technologieën, nieuwe energiebronnen en nieuwe energie-infrastructuur; deze veranderingen hebben alleen kans van slagen in combinatie met nieuwe organisatievormen en gedragswijzigingen. Bij technologische ontwikkeling leidend tot bijvoorbeeld betaalbare zonnecellen, het ter beschikking komen van tweede generatie biobrandstoffen en een betrouwbare afvang en opslag van kooldioxide, zijn realistische schattingen gemaakt van het tijdstip waarop deze op de markt komen. Er wordt aangegeven wat nodig is om zulke technologische ontwikkelingen te bevorderen. Met een rekenmodel is een kwantitatieve onderbouwing gegeven van de geschetste ontwikkelingen.

Niet alle in 2050 ingezette energiebronnen zullen geheel duurzaam zijn. In het bijzonder aan kernenergie, CO₂-opslag en biomassa moeten voorwaarden worden gesteld om deze verantwoord in te passen in een duurzame energiehuishouding. Wanneer deze bronnen voldoen aan de hier ontwikkelde criteria, voldoet het geschetste beeld aan realistische en haalbare maatstaven van duurzaamheid. Géén van de opties kan bij voorbaat worden uitgesloten gezien de grote uitdagingen waar we voor staan.





Voorwoord

We schrijven 30 september 2050. In de jaren '90 van de vorige eeuw begon klimaatverandering aandacht te krijgen. Toen waren er steeds meer wetenschappers die het verband aantoonde tussen de stijging van de concentratie broeikasgassen in de atmosfeer en verandering van het klimaat. Destijds was dat nieuw en niet onomstreden. Het beleid kwam langzaam in beweging. In 1997 was er de eerste mondiale afspraak om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen. Dit zogenoemde Kyoto Protocol mikte op een vermindering van de uitstoot met 5% in 2010, ten opzichte van het jaar 1990. De Verenigde Staten, Australië en de grote ontwikkelingslanden deden niet mee. Het was natuurlijk maar een aanzet, een kleine stap waarmee klimaatverandering nauwelijks werd geremd. Niet veel dus, maar toch een eerste trendbreuk. Tot veel verandering in de energiehuishouding leidde dat Kyoto Protocol niet. Alleen in een paar Europese landen werden wat stappen gezet met windenergie en energiebesparing. Dat kwam mede doordat de prijzen van olie en aardgas in die tijd erg laag waren, men zich geen zorgen maakte over de toevoer van olie en aardgas en doordat velen geloofden dat klimaatverandering wel mee zou vallen.

Dan kunnen we constateren dat rond 2007 het klimaatbeleid internationaal in een versnelling kwam. Dat was nadat in 2005 de VS waren geteisterd door een record aantal orkanen, doordat er nieuwe inzichten waren over de ernst van de economische gevolgen van klimaatverandering, door een heel warm jaar 2006 en doordat Al Gore, voormalig vice-president van de VS, een indringende documentaire uitbracht over klimaatverandering. Ook ontstond er toen veel ongerustheid over de beschikbaarheid en

de prijzen van olie en gas. De prijs van olie kende toen zijn eerste "big jump" en was in een paar jaar omhoog gegaan van 20 \$ per vat tot ongeveer 70 \$ per vat. Verder was de toenmalige Russische president begonnen met zijn energiemachtspolitiek door bij sommige landen de gaskraan dicht te draaien of daarmee te dreigen en door het buitenlandse investeerders moeilijk te maken. China en India werden economische machten waar rekening mee werd gehouden. De enorme groei in energieverbruik was daarvan een gevolg. Gelukkig begonnen bedrijven een praktische uitwerking te geven aan maatschappelijk verantwoord ondernemen. Bij beslissingen over nieuwe producten en investeringen werd de impact op energiegebruik en klimaat steeds vaker meegenomen.

In Europa beseften we dat we – als we niets zouden doen – steeds meer afhankelijk zouden worden van import van olie, gas en kolen, en dat de toevoer daarvan steeds onzekerder zou worden. Bovendien werd kernenergie slechts in een deel van de Europese lidstaten geaccepteerd. Ook hadden we door dat wij in Europa bij de aanpak van klimaatverandering beter initiatief konden nemen dan volgend te zijn. We hoopten wel dat andere regio's van de wereld ook zouden volgen want ook hun inzet was essentieel om klimaatverandering aan te pakken. We wisten toen nog niet dat de rest van de wereld daarin ging volgen.

De lezer wordt inspiratie en leesplezier toegewenst.



1. Inleiding

Het gaat niet goed met de energiehuishouding. Industrielanden worden steeds meer afhankelijk van importen van olie en aardgas, en de opwarming van de aarde gaat door. De energiegebruikers (bedrijven en consumenten) kennen deze bedreigingen wel, maar laten hun gedrag er meestal niet door beïnvloeden. Daarom moeten er impulsen van de overheid komen. Er is wel wat concreet beleid in Nederland en Europa, gericht op meer energiebesparing en duurzame energie, maar dat is nu nog slechts gericht op kleine veranderingen op korte termijn. Om echt de risico's van klimaatverandering te verminderen en de levering van energie op de lange termijn veilig te stellen, zijn forse veranderingen in de energievoorziening nodig. Vooral de uitstoot van CO₂ moet sterk worden teruggebracht. De Europese Commissie lijkt hiervan doordrongen te raken en ook het huidige Nederlandse kabinet heeft op dit gebied doelstellingen geformuleerd. Maar de meeste energiegebruikers realiseren zich nog niet wat dit concreet betekent.

Er ontbreekt een uitgewerkt duurzaam beeld van de energievoorziening rond het jaar 2050. De behoefte aan zo'n beeld komt wel telkens op, omdat het richting kan geven aan de plannen van bedrijven, onderzoekers en beleidsmakers. ECN en NRG zijn onderzoeksinstituten die zich richten op het ontwikkelen en tot toepassing brengen van hoogwaardige kennis en technologie voor een duurzame energiehuishouding. Zij vinden het belangrijk om zelf een helder beeld te hebben van een meer duurzame energiehuishouding rond het jaar 2050. Door duidelijkheid op dit gebied kan beter richting worden gegeven aan keuzes bij energieonderzoek. Zo'n beeld van een meer duurzame energievoorziening kan ook dienen ter inspiratie van bedrijven en overheden.

Het energiebeeld wordt uitgewerkt op Europese schaal, omdat de productie en het transport van energie tussen de Europese landen sterk zijn verknoot en Europa gaandeweg als een eenheid

optreedt. Plannen voor energiebeleid, klimaatbeleid, R&D-beleid en innovatiebeleid worden steeds meer vorm gegeven in Europees verband. Het jaar 2050 is gekozen omdat -gezien de lange levensduur van veel energie-infrastructuur- op die tijdschaal forse veranderingen in de energiehuishouding mogelijk zijn. Het beeld is zo vorm gegeven dat de uitstoot van CO₂ met 60% wordt teruggebracht ten opzichte van de uitstoot in 1990. Als dat gebeurt en andere wereldregio's nemen vergelijkbare stappen, dan wordt de opwarming van de aarde beperkt tot ongeveer 2 graden Celsius. Dit is een temperatuurstijging waarvan de gevolgen -volgens huidige consensus- nog door de wereld kunnen worden opgevangen. In het beeld zit ook minder import van olie en gas. De opstellers hebben geprobeerd een zo bruikbaar mogelijk beeld te schetsen, uitgaande van realistische en tegelijkertijd ambitieuze ontwikkelingen in de technologie en in het gedrag van bedrijven en consumenten. Het beeld is ontwikkeld door een projectteam met kennis van energievoorziening, nieuwe technieken en effecten van beleid. Om de consistentie te checken is het resultaat doorgerekend met een integraal energiemodel.

In dit beeld vinden we vooral veel nieuwe technologieën, nieuwe energiebronnen en nieuwe energie-infrastructuur, omdat daarmee de meeste verduurzaming is te behalen; dat neemt niet weg dat nieuwe organisatievormen en gedragswijzigingen eveneens een essentiële bijdrage zullen moeten leveren.



ECN en NRG realiseren zich dat toekomstige ontwikkelingen niet precies zijn te voorspellen. De verwachtingen rond technologische ontwikkelingen zijn goed onderbouwd, maar in de praktijk zullen er meevallers zijn op sommige gebieden en tegenvallers elders. De opstellers verwachten dat mee- en tegenvallers elkaar grotendeels zullen compenseren en dat het gros van de gepresenteerde veranderingen robuust zullen blijken. Deze visie moet overigens niet worden gezien als een eindpunt in de discussie, maar als een tussenpunt. In ieder geval is het nuttig zo'n beeld na ongeveer 5 jaar te toetsen aan nieuwe inzichten en aan te scherpen. Reacties op dit beeld worden verwelkomd.

De opbouw van dit document is als volgt. In hoofdstuk 2 wordt het beeld van een duurzame energiehuishouding in 2050 geschetst. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 aangegeven waarom is gekozen voor dit beeld. In hoofdstuk 4 komt de vraag aan de orde wat nodig is om het geschetste beeld realiteit te laten worden. De lessen die kunnen worden getrokken uit het beeld worden gepresenteerd in hoofdstuk 5 en dit document sluit af met een discussiehoofdstuk.



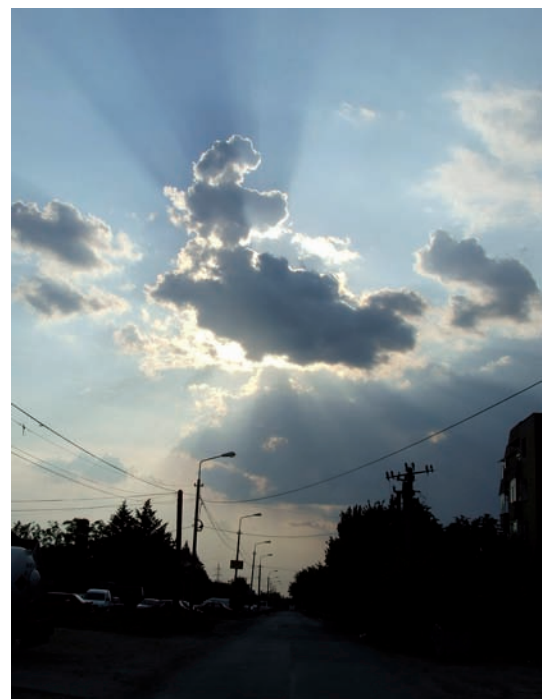
2. Beeld van een duurzame energiehouding in 2050

2.1 Hoofdlijnen

We schrijven 2050. De wereldproductie van aardolie heeft een piek bereikt in 2015 en is daarna gestaag gedaald. Dit heeft geleid tot grote schommelingen van en sterke stijgingen in de olieprijs, die nu rond de 100 dollar per vat ligt. Ook de prijs van aardgas is flink gestegen. Aangezien de Europese Unie een ambitieus klimaatbeleid heeft gevoerd, zijn de CO₂-emissies met 60% teruggebracht, vergeleken met het jaar 1990. Het heeft wel jaren geduurd om zo ver te komen, beginnend met een 20% emissiereductie in 2020. Het blijft, ook voor de jaren na 2050, een uitdaging om het tempo van emissiereductie niet te laten verslappen. Er zijn nog voldoende mogelijkheden om het aandeel hernieuwbare energie door te laten groeien, terwijl de (groei van) de energievraag nog steeds verder kan verminderen.

In de afgelopen decennia is er een forse afname geweest van de bijdrage van de fossiele energiebronnen olie en gas, en zodoende ook van de import afhankelijkheid voor deze bronnen. Als gevolg

van het klimaatbeleid zijn kolen met CO₂-opslag grootschalig ingezet voor de productie van zowel elektriciteit als waterstof. Deze waterstof wordt in de transportsector gebruikt. Veel steenkool wordt geïmporteerd. Er worden strenge eisen gesteld aan arbeidsomstandigheden en milieueffecten van kolenwinning in het land van herkomst.

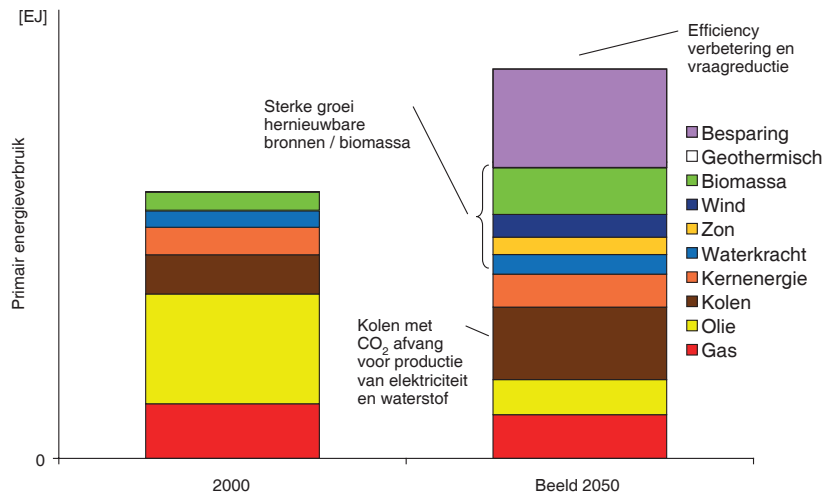


Er is veel groei bij duurzame energiebronnen, die in 2050 goed zijn voor meer dan 35% van de energievoorziening, met een flinke rol voor biomassa, windenergie en zon. Er is ook sterk ingezet op energiebesparing. Het tempo van energiebesparing is gemiddeld 1.5% per jaar geweest, o.a. dankzij intensieve energiebesparingsstrategieën, met veel aandacht voor geheel nieuwe technieken en concepten. Over een periode van 43 jaar is dat bijna 50% besparing.

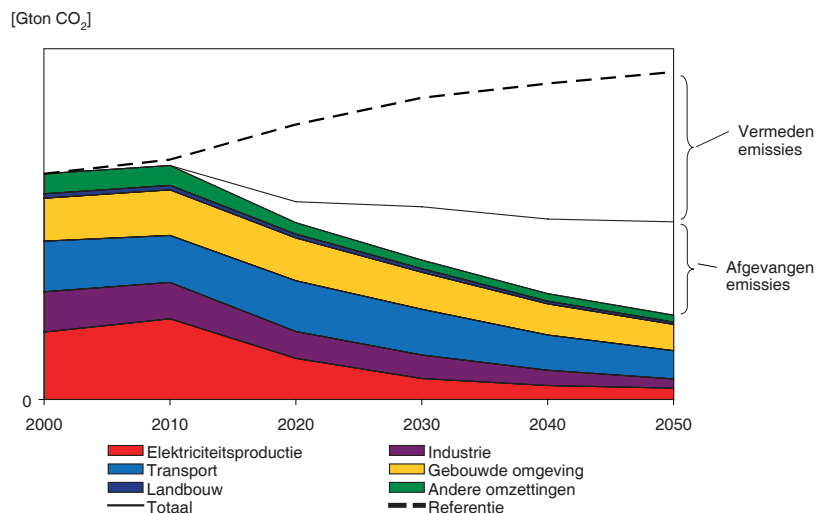
De energievraag van woningen en gebouwen is sterk verminderd, en wordt voornamelijk ingevuld met zonne-energie, elektriciteit en aardgas. Biomassa wordt vooral toegepast als brandstof voor vrachtverkeer, scheepvaart en luchtvaart, omdat er in deze sectoren weinig andere alternatieven voor olieproducten zijn. Een klein deel van de biomassa wordt gebruikt voor elektriciteitsproductie via geavanceerde vergassingsprocessen. De Europese landbouw en bosbouw zijn veel biomassa gaan produceren en doen dat op duurzame wijze. Daarnaast worden biomassa en daaruit geproduceerde brandstoffen geïmporteerd, mits de duurzaamheid van teelt en conversie wordt aangetoond. Kernenergie wordt beperkt toegepast, omdat slechts in ongeveer de helft van de EU lidstaten steun is voor kernenergie. In deze landen zijn nieuwe kernreactoren gebouwd, maar de netto bijdrage van kernenergie is nauwelijks gegroeid. CO₂-afvang en -opslag vinden in ruime mate plaats in elektriciteitsopwekking en industrie. In totaal wordt evenveel CO₂ afgevangen als er nog CO₂ wordt uitgestoten. Hiervoor is voldoende opslagcapaciteit beschikbaar, onder meer in aquifers en lege gasvelden.

De grote inzet van duurzame energiebronnen heeft geleid tot aanpassingen in het elektriciteitsnet. Omdat elektriciteitsproductie uit zon en wind afhankelijk is van het weer, moeten fluctuaties van enerzijds kleine zonnepanelen en anderzijds grote windcentrales in het net kunnen worden opgevangen. Hiervoor zijn intelligente koppelingen en interactief netbeheer ontwikkeld. Het koppelnet is versterkt, en er zijn extra voorzieningen voor opslag van elektriciteit gekomen.

Voor het bereiken van een 60% lagere uitstoot van CO₂ is in alle sectoren een grote inspanning gepleegd. De reductie is het grootst in de elektrici-



Figuur 1 Primair energieverbruik in Europa in 2000 en in het duurzame beeld in 2050



Figuur 2 CO₂-emissies en -afvang per sector in Europa

teitsproductie, doordat de CO₂-uitstoot daar direct bij de centrales kan worden afgevangen, en doordat er veel hernieuwbare bronnen worden ingezet. Verderop in dit hoofdstuk bespreken we de maatregelen die er in de diverse sectoren toe bijgedragen hebben dat deze emissiereductie verwezenlijkt kon worden.

2.2 Gebouwde omgeving

In de gebouwde omgeving - huishoudens, diensten en overheid - hebben de hoge gasprijzen in combinatie met strikte regulering en continue voorlichtingscampagnes geleid tot een sterke beperking van de vraag naar ruimteverwarming, in het bijzonder in de noordelijke EU-landen. Er heeft een verdere verschuiving plaatsgevonden van gas naar elektriciteit als belangrijkste energiedrager in woningen en gebouwen. Nieuwe woonwijken hebben geen aardgasnet. Gas heeft nog wel een belangrijke rol in oudere wijken. Door verandering van het klimaat is de warmtevraag iets lager; maar de behoefte aan koeling is gestegen, vooral in het zuiden van Europa.

Van de gebouwen in Europa is bijna de helft na 2000 neergezet; deze voldoen aan strenge isolatie-eisen. Architecten hebben bij het ontwerp al rekening gehouden met de ligging ten opzichte van de zon, zodat passieve zonne-energie optimaal benut wordt. Oudere gebouwen zijn bij renovatie verplicht nageïsoleerd. Opslag van warmte wordt veel toegepast op woning- en wijkniveau. Elektrische warmtepompen worden gebruikt om te voorzien in de resterende warmte- en koelvraag. In oudere gebouwen of wijken worden ook gasgestookte warmtepompen toegepast. Groen gas (synthetisch aardgas, SNG) wordt nauwelijks ingezet, omdat vrijwel alle beschikbare biomassa in de transportsector wordt gebruikt.



Figuur 3 Woning die gebruik maakt van zonne-energie



Woningen benutten zonne-energie ook actief, met zonnecellen mét en zónder warmteproductie: voor elektriciteit, warm tapwater en elektrische koeling. Er is sterk ingezet op energiebesparing, onder meer door intelligente regelingen en efficiënte apparaten, waarvoor in de EU strenge normen zijn ontwikkeld.

De bijdrage van aardgas is gedaald, en er is geen waterstofinfrastructuur in de gebouwde omgeving aangelegd; daardoor heeft gecombineerde opwekking van elektriciteit en warmte in gebouwen op basis van aardgas of waterstof (micro-WKK) geen grote vlucht genomen. Bovendien vindt elektriciteitsopwekking zo efficiënt plaats dat het relatieve voordeel van de warmtekracht koppeling 'op zolder' daarmee teniet wordt gedaan.

Voor woningen en gebouwen is comfort van groot belang; daar is veel aandacht aan geschonken bij het toepassen van nieuwe energietechnologieën. Er was in het begin veel scepsis bij bouwers en installateurs, maar deze is overwonnen door van energie-efficiency een speerpunt te maken in de bouwwereld, met veel demonstratieprojecten en het vastleggen van ervaringen voordat technieken grootschalig werden toegepast, en ook met aandacht voor energiebesparing in de opleidingen.

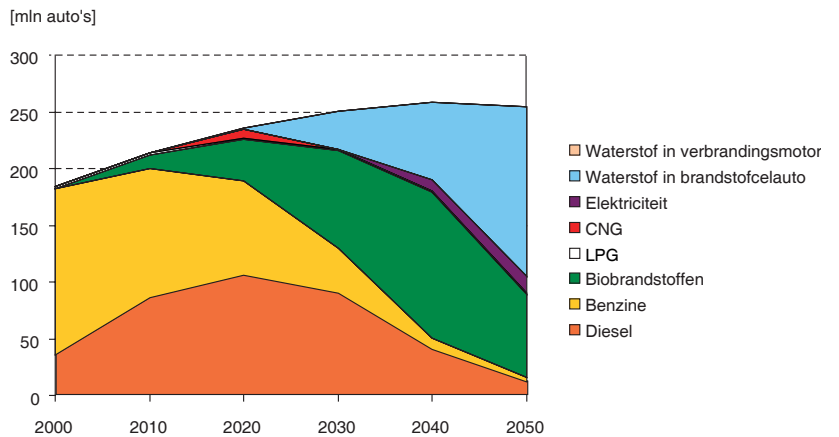
2.3 Transportsector

In 2050 is de transportsector ingrijpend veranderd. De schaarste aan olieproducten en het sterke klimaatbeleid hebben de overgang naar alternatieve brandstoffen en aandrijvingen versneld. Na de invoering van rekeningrijden is autorijden duurder geworden. Er wordt meer gebruik gemaakt van het openbaar vervoer, dat flexibel en van goede kwaliteit is.

Personenauto's zijn veel zuiniger geworden, dankzij efficiënte verbrandingsmotoren, standaard toepassing van hybride concepten, waarbij de remenergie teruggewonnen wordt, en lichte materialen. Een forse vergroting van de opslagcapaciteit van batterijen is uitgebleven, waardoor het aandeel van de plug-in hybride die met een losse accu aan het elektriciteitsnet opgeladen wordt, beperkt is. Dankzij geavanceerde ICT zijn files zeldzaam geworden. Automobilisten worden ruim van tevoren in hun auto geïnformeerd over opstoppingen, en er wordt automatisch afstand gehouden op snelwegen, wat het aantal ongelukken sterk verminderd heeft. Telewerken is gangbaar als middel om de spits te vermijden en brandstof te besparen. In het stadsverkeer wordt veel gebruik gemaakt van bestelauto's met een elektrische motor gevoed door een accu of brandstofcel, wat ten goede komt aan de lokale luchtkwaliteit.



Waterstof kan in grote delen van Europa getankt worden. In de begintijd werd de waterstof uit aardgas geproduceerd, met CO₂-opslag, maar vanwege de gestegen gasprijs is overgeschakeld op kolen met CO₂-opslag. Het aantal brandstofcelauto's groeit snel, omdat de kosten van de brandstofcel fors gedaald zijn. Hierbij is rond 2020 het Europese '100.000 brandstofcelauto's' programma van doorslaggevend belang geweest, omdat het autofabrikanten een prikkel gaf om grotere series te gaan produceren. Dankzij de hoge efficiëntie van de brandstofcel is rijden in een brandstofcelauto in 2030 ongeveer even duur als rijden in een benzine- of dieselauto. In 2050 rijdt ongeveer 50% van het aantal personenauto's op waterstof. In een deel van de personenauto's wordt nog biobrandstoffen gebruikt, puur of gemengd met olieproducten. Voor



Figuur 4 Personenauto's en brandstoffen in Europa

kleine afstanden wordt de fiets gebruikt, eventueel met elektrische trapondersteuning, vooral nu in heel Europa veilige fietsroutes zijn aangelegd.

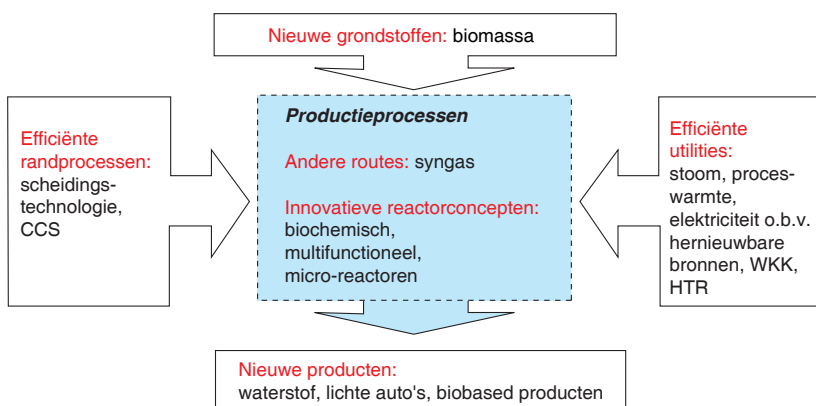
Voor het vrachtverkeer, dat lange afstanden rijdt met een zware belading, is de dieselmotor nog steeds de beste keuze. De meeste vervoerders kiezen voor biodiesel, gemaakt uit houtachtige gewassen door middel van geavanceerde processen, zoals het Fischer Tropsch proces. Hetzelfde geldt voor bussen, die standaard uitgevoerd worden als een (bio)diesel hybride, behalve in een aantal grote steden, waar waterstoffbussen rondrijden. Ook de scheepvaart is overgegaan op biodiesel. Nog ongeveer 30% van de in Europa getankte diesel is uit aardolie gemaakt. Het vliegverkeer maakt voornamelijk gebruik van biokerosine.



2.4 Industrie

In 2050 is de industrie in Europa aanzienlijk veranderd. Olie is in eerste instantie nog wel in de chemische sector gebruikt, maar later vervangen door biomassa als grondstof voor chemicaliën en transportbrandstoffen. Via bioraffinage wordt optimaal gebruik gemaakt van het grote aantal al in biomassa aanwezige stoffen. Syngas-technologie (vergassing bij hoge temperatuur) is gangbaar voor de productie van synthetische brandstoffen. Grondstoffen hiervoor zijn biomassa en kolen met CO₂-afvang, die eerst in syngas worden omgezet; uit syngas worden Fischer Tropsch diesel en waterstof gemaakt, evenals kunststoffen, ethanol etc. Als gevolg van het intensieve klimaatbeleid is er ook vraag gekomen naar nieuwe producten, zoals kunststoffen voor de productie van lichtere auto's.

Door een consequente aanpak van alle mogelijkheden voor energiebesparing is het energieverbruik van de industrie met een kwart gedaald ten opzichte van het begin van de 21e eeuw, terwijl de productie gegroeid is. Het 3R principe "reduce - reuse - recycle", waarbij gekeken wordt naar de complete levenscyclus van materialen, heeft daarbij ook een rol gespeeld. Daarnaast is er een duidelijke verschuiving naar meer (klimaatneutraal geproduceerde) elektriciteit ten koste van olie, gas en kolen.



Figuur 5 De belangrijkste aangrijpingspunten voor energiebesparing en CO₂-emissiereductie in de industrie



Hiervoor zijn innovatieve processen ontwikkeld met een aanzienlijke energiebesparing. Een belangrijk voorbeeld is het gebruik van biochemische reactoren, waarin biomassa wordt omgezet in producten met behulp van enzymen en bacteriën. Ook multifunctionele reactoren worden veel toegepast; hierin worden omzetting van grondstoffen en afscheiding van producten met elkaar gecombineerd. Veel industriële processen vinden plaats op kleine schaal, in microreactoren, waardoor de reactieomstandigheden veel beter kunnen worden gecontroleerd en energie wordt bespaard. Veel processen zijn veel selectiever geworden, onder andere door het gebruik van nieuwe katalysatoren, waardoor minder grondstoffen worden gebruikt en veel minder afval wordt geproduceerd. De ontwikkeling van deze nieuwe technologieën heeft een grote R&D-inspanning gevergd. CO₂-afvang technologie wordt niet alleen bij elektriciteitsproductie gebruikt, maar ook toegepast in diverse industriële processen (staalproductie, cementproductie, waterstof-/ammoniakproductie). De CO₂-stroom is hier redelijk geconcentreerd, waardoor afvang van CO₂ minder kost dan in de elektriciteitssector.

Er is vanaf het begin ook sterk gelet op energiebesparing bij randprocessen als behandeling van afvalwater, en bij de productie van 'utilities': warmte, elektriciteit en waterstof. Warmtepompen worden gebruikt om warmte op te waarden en om restwarmte in te zetten voor koeling. Ook warmteopslag en warmtekracht koppeling worden toegepast waar mogelijk. In sommige landen worden kleinschalige, inherent veilige kernreactoren (HTR) als warmtekrachtssystemen toegepast. De warmtevraag

die nog over is, wordt voor een belangrijk deel afgedekt door de inzet van laagwaardige biomassa. Scheidingstechnologie is efficiënter geworden, en er is veel energie bespaard door destillatieprocessen te vervangen door membraan- of sorptieprocessen.

2.5 Elektriciteitsopwekking en -distributie

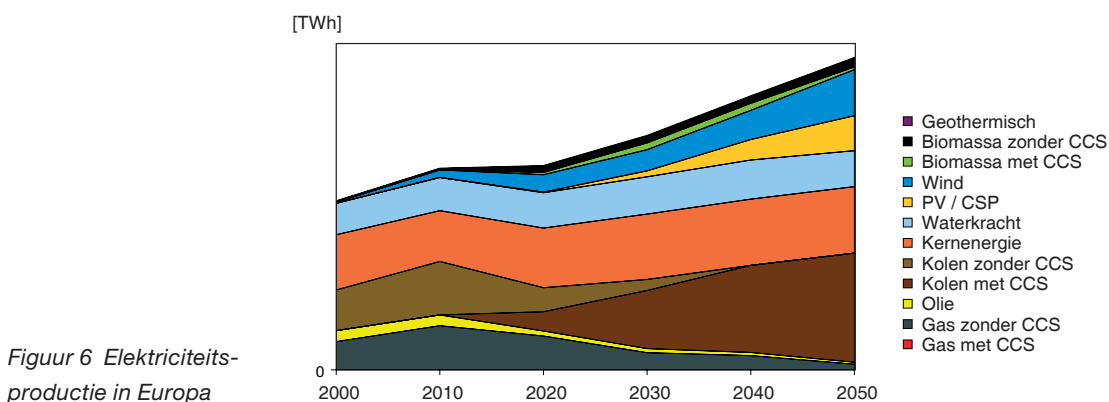
In 2050 wordt ongeveer 40% van de elektriciteit nog opgewekt met fossiele brandstoffen, grotendeels uit kolen met CO₂-afvang. Hernieuwbare energie levert een vergelijkbare bijdrage, terwijl circa 20% van de stroom in Europa afkomstig is uit kernenergie. De productiekosten van elektriciteit zijn met een factor 2,5 gestegen, vergeleken met het jaar 2000.

Er is sterk ingezet op duurzame energiebronnen om de drastische CO₂-reductie te bewerkstelligen. Windenergie, fotovoltaïsche zonne-energie (PV) en zonthermische systemen voor elektriciteitsopwekking (Concentrated Solar Power - CSP) leveren een groot deel van de elektriciteit. Het windvermogen is gegroeid met een factor 15 ten opzichte van 2000. Er is ongeveer 100 GW offshore windvermogen opgesteld, ofwel ongeveer 200 windparken van 500 MW in de territoriale wateren van vooral Nederland, Engeland, Denemarken en Duitsland. Ook op de stranden van de Middellandse zee is men gewend geraakt aan het uitzicht op windmolens aan de horizon. Het windvermogen op land is gegroeid naar zo'n 140 GW. Windturbines op land hebben over het algemeen een vermogen rond de 3 MW, wat minder dan die op zee (5 MW). Windparken op land zijn verspreid door heel Europa, met name in de windrijke landen.

CSP-centrales zijn voor het grootste deel geplaatst in Zuid-Europa en worden uitgevoerd met grote warmtebuffers. Zon-PV systemen zijn in kosten gedaald. Dankzij omvangrijke subsidieprogramma's, een consistente R&D-ondersteuning en een intensieve samenwerking tussen industrie en kennisinstellingen kon de kostprijs van zonnestroom na twee decennia concurreren met de kleinverbruikerprijs voor elektriciteit. Ongeveer driekwart van de elektriciteitsproductie uit zonne-energie vindt plaats met behulp van PV.

Biomassa wordt flexibel ingezet in grootschalige 'X to Y' vergassingsinstallaties, die enerzijds kunnen switchen tussen verschillende brandstoffen en anderzijds tussen verschillende eindproducten zoals warmte, elektriciteit, en transportbrandstoffen. De bijdrage van biomassa aan de elektriciteitsproductie is met 5% relatief gering, omdat de beschikbare biomassa op grote schaal ingezet wordt als basis voor transportbrandstof.

Sinds er op EU-niveau een besluit is genomen over de bestemming van het radioactief afval, is er in ongeveer de helft van de EU-lidstaten genoeg steun voor kernenergie om nieuwe 'vierde generatie' kerncentrales te bouwen, die voldoen aan de hoogste veiligheidseisen. Daarnaast is er nog een groot aantal 'derde generatie' EPR centrales in bedrijf. Een belangrijke mijlpaal was de oprichting in 2015 van een supranationaal orgaan dat wereldwijd toeziet op het gebruik van splijtbaar materiaal, om daarmee proliferatie te voorkomen.



Bij de transmissie en distributie van elektriciteit wordt in 2050 geavanceerde ICT gebruikt, omdat rekening gehouden moet worden met de plaats en het moment van het aanbod ten opzichte van de vraag. Nu gemiddeld een kwart van het productievermogen afhankelijk is geworden van fluctuerende energiebronnen, zoals wind, zon en kleinschalige waterkracht - en in een land als Denemarken zelfs 50% - is het beslist nodig om vraag en aanbod van elektriciteit in de tijd goed op elkaar af te stemmen. Grootchalige elektriciteitscentrales - kolencentrales met CO₂-afvang en kerncentrales - zijn niet erg flexibel en daardoor minder geschikt om als regelvermogen te functioneren; daarom speelt kleinschalig vermogen hierbij een grote rol. Elektrische warmtepompen worden bijvoorbeeld automatisch al naar gelang behoefte aan- of uitgeschakeld, wat mogelijk is doordat ze bij hun warmtelevering gebruik maken van warmtebuffers. Ook is men recent begonnen elektriciteit op te slaan met behulp van

elektrochemische opslagtechnologie. Afstemming van vraag en aanbod wordt verder bewerkstelligd door marktmechanismen waarmee de elektriciteitsvraag reageert op de spotprijs van stroom, met 'realtime pricing'. En verder is van belang dat regionale elektriciteitstekorten en -overschotten via het (Europese) hoogspanningsnet worden uitgewisseld. Al deze verschillende mogelijkheden concurreren met elkaar, zowel op de korte termijn (operationeel) als op de lange termijn (investeringen). In 2050 is er vanwege het groeiende aandeel van fluctuerende energiebronnen behoefte aan verdergaande flexibiliteit. Daarom zijn enkele landen begonnen met het bouwen van spaarbekkens, grote opslagbassins voor water die volgepompt worden als er een overschot van elektriciteit is, en leegstromen als er een tekort aan stroom is. Om al deze aanpassingen mogelijk te maken zijn in 2050 ook instituties en regelgeving op dit gebied veranderd.





Naast de grootschalige elektriciteitsproductie (uit kolen, kernenergie, offshore wind en CSP), wordt een deel van de elektriciteit decentraal opgewekt om direct door afnemers te worden gebruikt of lokaal te worden gevoed in het elektriciteitsnet. Dit gebeurt op middenspanningsniveau bij warmtekracht koppeling (WKK), wind op land en kleinschalige waterkracht, of op laagspanningsniveau bij zon-PV en micro-WKK. Warmtekracht koppeling

is daarbij afhankelijk van de beschikbaarheid van lokaal aanwezige brandstoffen of energiedragers, zoals biomassa, waterstof of groen gas (SNG). Daar waar door de aanwezigheid van lokale duurzame energiebronnen vrij veel kleinschalige elektriciteitsproductie plaatsvindt, worden de elektriciteitsnetten met slimme technologie aangestuurd om vraag en aanbod via ICT op elk moment op elkaar af te stemmen.

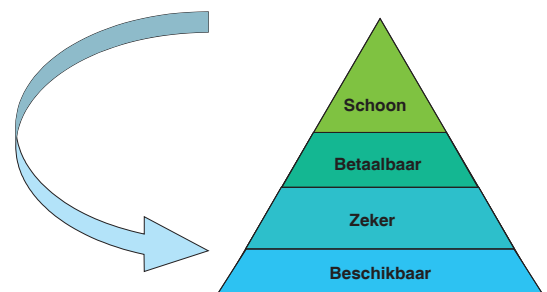


3. Waarom dit beeld van een duurzame energiehouding?

3.1 Schone energie is een basisbehoefte in 2050

Energie is één van de basisbehoeftes van de mens. Energie moet in de eerste plaats beschikbaar zijn; grote delen van de wereldbevolking hebben in 2007 nog niet of nauwelijks de beschikking over energie. Als energie beschikbaar is, moet die voorziening vervolgens ook betrouwbaar zijn. Daarnaast moet energie betaalbaar zijn en tenslotte moet de energie ook op een schone manier geproduceerd worden. Schoon betekent in eerste instantie zonder schadelijke emissies, maar het begrip is veel breder. In de volgende paragraaf wordt hier nader op ingegaan.

Naar analogie van de piramide van Maslov, waarin de basisbehoeften van de mens zijn gerangschikt, kan ook voor de energiebehoefte zo'n piramide gemaakt worden. Deze rangorde komt erop neer dat schone, duurzame vormen van energieopwekking alleen dan gebruikt gaan worden als daarmee de beschikbaarheid, zekerheid en betaalbaarheid niet aangetast worden.



Figuur 7 De energiebehoefte piramide. Naar (Frei, 2005)

In 2050 is 'schoon' belangrijk geworden in de energiepiramide. We weten in 2050 dat vervuiling die gepaard gaat met energieopwekking en -verbruik andere basisbehoeften van de mens in gevaar brengt. De klimaatverandering veroorzaakt door de toenemende CO₂ concentratie in de atmosfeer bedreigt de voedselvoorziening en indirect de veiligheid van de mens. Ook de emissies van roet en stikstofoxiden zijn schadelijk voor de gezondheid en treffen vooral stadsbewoners. Dit heeft ervoor gezorgd dat we in Europa schone energiebronnen prioriteit hebben gegeven en 'schoon' als randvoorwaarde voor alle energieopties hebben gesteld. Dus alle nieuwe energie-opwekking moet schoon zijn, maar de nieuwe schone opties moeten wel betrouwbaar en betaalbaar zijn.

De in het vorige hoofdstuk gepresenteerde visie voldoet aan deze criteria. In 2050 wordt 60% minder CO₂ uitgestoten bij het gebruik van energie in Europa. In elke sector wordt tenminste 30% minder uitgestoten dan in 1990. In de elektriciteitsproductie is de reductie zelfs aanzienlijk groter, omdat hier de meeste mogelijkheden zijn, inclusief CO₂-afvang en -opslag.

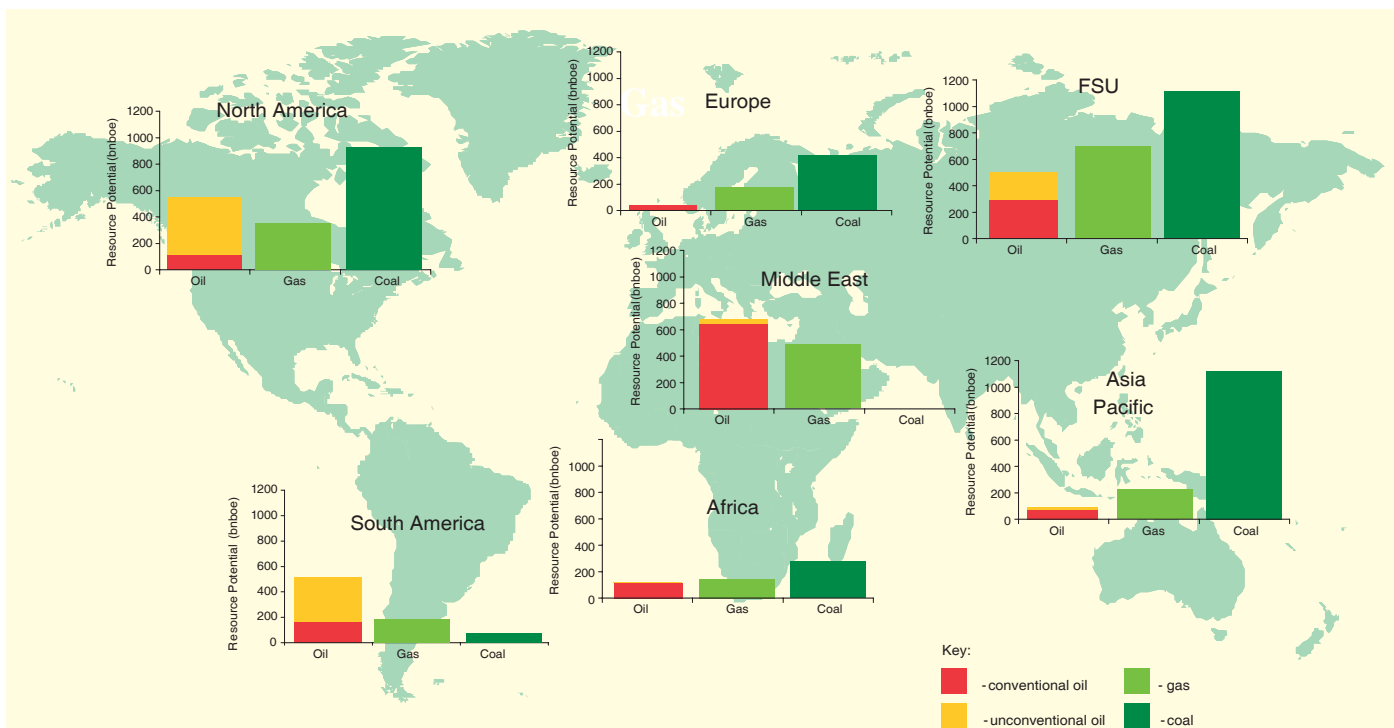
De energievisie is ook realistisch op de gebieden voorzieningszekerheid en betaalbaarheid. In 2050 zijn de voorraden olie en gas verder geslonken; de prijzen zijn navenant gestegen. De prijzen van olie en gas zijn gestegen tot resp. 100 \$₂₀₀₅ per vat en 75 \$₂₀₀₅ per vat olie-equivalenten in 2050. De prijs van kolen stijgt ook, maar minder dan die van olie en gas. De prijs van CO₂ is in 2050 al twee decennia stabiel op een niveau van ongeveer 100 €/tCO₂. Andere bronnen hebben de rol van olie en gas deels overgenomen. Europa is per saldo minder afhankelijk van de import van energiedragers. De behoefte aan een betrouwbare energievoorziening is gewaarborgd door spreiding van de energieopwekking over verschillende technologieën. Van de vele mogelijkheden die dan overblijven om energie op te wekken of te gebruiken, leveren de meest betaalbare technologieën de grootste bijdrage.

Verder geeft de energievisie een plausibel, kloppend beeld. Zowel op het moment van schrijven als in 2050 zijn er bijvoorbeeld grenzen aan de beschikbaarheid van aardolie, aardgas en biomassa, en daarmee is rekening gehouden. Bij de toegepas-

te integrale analyse blijkt verder dat er conflicterende claims tussen sectoren bestaan, waarin keuzes moeten worden gemaakt. Biomassa bijvoorbeeld kan worden toegewezen aan elektriciteitsproductie, productie van chemicaliën of transport; bij zulke beslissingen hebben de opstellers zich laten leiden door overwegingen als de beschikbaarheid van alternatieven, de bijdrage aan reductie van CO₂-emissies en betaalbaarheid.



Naast reductie van CO₂-emissies hebben allerlei andere factoren een rol gespeeld bij de veranderingen in de energiehuishouding in 2050. Een belangrijk voorbeeld is de verbetering van de luchtkwaliteit door verlaging van de roet- en NO_x-emissies van verkeer en industrie. In 2050 behoort het probleem van de gezondheidsbedreigende luchtverontreiniging tot het verleden. In 2050 accepteert het publiek opties als kernenergie, CO₂-opslag en biomassa, maar alleen als aan een aantal voorwaarden is voldaan.



Figuur 8 Voorraden van olie, kolen en gas in verschillende regio's (miljard barrels olie equivalent). Bron: BP data

Voorzieningszekerheid

Olie, gas, kolen en uranium zijn allemaal eindige bronnen. Deze vier energiedragers dekken momenteel ruim 90% procent van de Europese energievraag. Zij zullen eens uitgeput raken, maar het antwoord op de vraag wannéér het einde van de voorraden in zicht komt, verschilt per bron en hangt verder af van degene aan wie je de vraag stelt. Van olie en gas gaan velen ervan uit dat in deze eeuw het einde van de voorraden in zicht komt en dat de prijzen daardoor flink zullen stijgen. Voor kolen en uranium worden tot 2050 nog geen voorraadproblemen voorzien. Maar de sterke stijging van de vraag naar kolen zal wel tot een prijsstijging leiden en in sommige studies worden zelfs voor kolen voorraadproblemen verwacht (Kavalov, 2007).



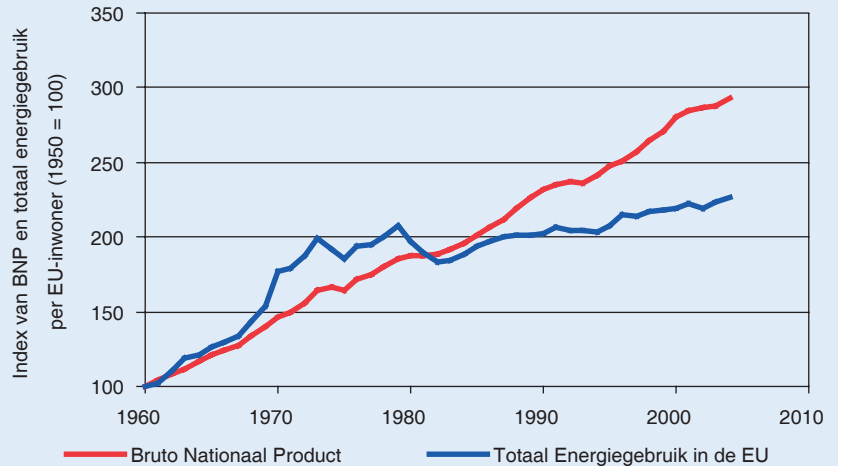
Om een zekere energievoorziening te garanderen is de beschikbaarheid van voorraden een eerste vereiste, maar de energiedragers moeten ook daadwerkelijk geleverd worden. En de levering uit landen in het Midden Oosten, Noord-Afrika en de voormalige Sovjet-Unie is niet altijd even zeker, onder meer om politieke redenen. De figuur laat zien dat zich juist daar de grote olie- en gasvoorraden bevinden. Kolenvoorraden zijn gelijkmatiger over de wereld verspreid. Uranium wordt voornamelijk in Canada en Australië gewonnen. Onconventionele olie (teerzanden en schalie) zijn in delen van de wereld in grote hoeveelheden aanwezig. Maar de winning van die voorraden leidt tot zeer hoge CO₂-emissies. Europa zelf heeft beperkte olie- en gasvoorraden. Om de zekerheid van de energievoorziening te verhogen zal Europa moeten omschakelen naar zonn, wind, biomassa en kolen.

Voorzieningszekerheid hangt niet alleen af van voorraden, maar ook van de zekerheid en betrouwbaarheid van aanvoerroutes en transportmiddelen. Daarom is ook diversificatie nodig van deze routes en transportmiddelen.

Huidig energiegebruik in Europa en de wereld

De toenemende vraag naar energie is misschien wel het belangrijkste motief voor de ontwikkeling van een meer duurzame energiehuishouding; vooral als die toenemende vraag gedekt wordt door olie- en kolengebruik en de daarmee gepaard gaande CO₂-uitstoot. In 2007 wordt 50% van de CO₂ uitgestoten door de rijke industrielanden, waar 18% van de bevolking leeft. De andere 82% van de wereldbevolking veroorzaakt de andere helft van de wereld CO₂-emissie.

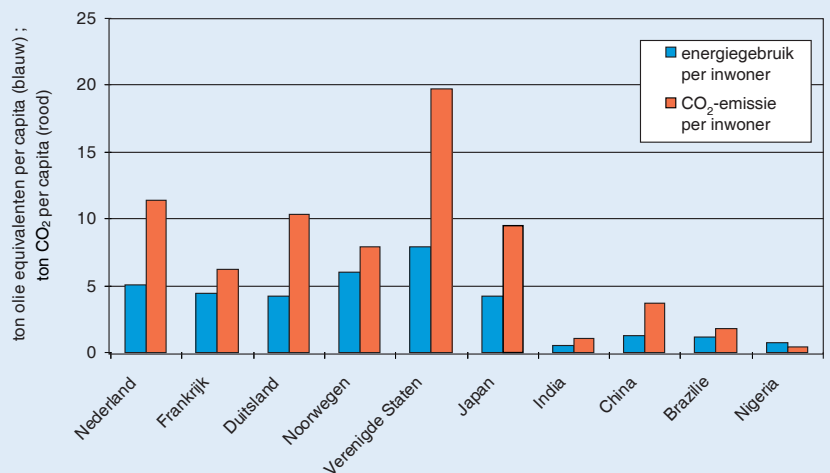
De EU is nu nog een grote gebruiker van energie en levert een grote bijdrage aan de mondiale CO₂-emissie. Er zijn landen die per hoofd van de bevolking meer uitstoten, maar er zijn veel méér landen waar het energieverbruik veel lager is dan in Europa, zoals blijkt uit Figuur 9. De met energiegebruik gepaard gaande CO₂-uitstoot per inwoner van China en India is in 2007 maar 10 tot 30% die van een Europeaan. Uit de historische trend in de EU is duidelijk dat groei van de economie leidt tot groei van het energiegebruik. De explosieve groei van de economie in China en de verwachte groei in India, Latijns Amerika en Afrika zullen dus leiden tot een hoger energiegebruik per hoofd van de bevolking. In 2050 zal het energiegebruik van veel meer wereldbewoners op het niveau van de Europeanen zitten. Het aandeel van Europa in het wereldenergiegebruik zal dan een stuk geringer zijn dan nu. De strijd om de beschikbare bronnen wordt dus harder en het wordt moeilijker om wereldwijd de CO₂-emissies te verlagen. Dit maakt de keuze voor duurzame bronnen voor Europa noodzakelijk.



Figuur 9 BNP en energieverbruik per hoofd van de bevolking in de EU-15.

Bron: (IEA, 2006)

In Europa is in 2050 de welvaart flink gestegen, maar het energiegebruik per hoofd van de bevolking is minder snel gestegen. De bevolkingsgroei is na 2010 minder snel gegaan, en na 2020 is zelfs een daling van het Europese bevolkingsaantal ingezet.



Figuur 10 Energiegebruik en CO₂-emissie per inwoner in een aantal landen in 2004. Bron: (IEA, 2006)

In Nederland wordt per inwoner relatief veel CO₂ uitgestoten, één van de redenen hiervoor is dat er in Nederland veel industrie is. Inwoners van Frankrijk stoten juist relatief weinig CO₂ uit, dankzij de grote bijdrage van kernenergie in de elektriciteitsproductie.



Klimaatverandering

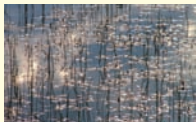

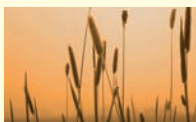

In 2007 heeft het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) van de Verenigde Naties het vierde klimaatrapport gepubliceerd, waaruit blijkt dat de opwarming van de aarde onmiskenbaar is (IPCC, 2007). Sneeuw en ijs smelten op grote schaal en het mondiale zeeniveau stijgt. Er is een zeer grote waarschijnlijkheid dat menselijke activiteiten – vooral de uitstoot van broeikasgassen en het veranderd grondgebruik – voor die opwarming hebben gezorgd. De atmosferische concentratie van CO₂, het belangrijkste broeikasgas, is toegenomen van 280 ppm (parts per million) in het jaar 1750 tot 379 ppm in het jaar 2005.

Door de traagheid van het klimaatsysteem zal, zelfs als de CO₂ concentratie in de atmosfeer gelijk blijft aan die van nu, de temperatuurstijging nog decennialang doorgaan. De CO₂ concentratie in de atmosfeer zal echter niet gelijk blijven: in de afgelopen 10 jaar was de gemiddelde stijging van de CO₂ concentratie 1,9 ppm per jaar. Afhankelijk van de toename van de CO₂-concentratie en de

reactie van het klimaat daarop, wordt een mondiale gemiddelde temperatuurstijging verwacht in 2100 van tussen 1,1 en 6,4°C. Tabel 1 toont de gevolgen van verschillende niveaus van temperatuurstijging. Zelfs in het meest gunstige geval zijn er ingrijpende maatregelen nodig om de gevolgen van de temperatuurstijging op te vangen. Ook heeft klimaatverandering invloed op de energieproductie, bijvoorbeeld op waterkrachtcentrales en biomassa-productie.

Een stijging met maximaal 2°C wordt gezien als een niveau waarbij de kans nog beperkt is dat er gevaarlijke effecten door verandering van het klimaatsysteem optreden. Om de temperatuurstijging tot 2°C te beperken mag de broeikasgasconcentratie in de atmosfeer niet verder stijgen dan tot ongeveer 450 ppm. Om deze doelstelling te halen, moet al vanaf 2015 de wereldwijde broeikasgasemissie gaan dalen. In 2050 moet de wereldemissie met 50-80% gedaald zijn. De stijgende trend in de CO₂-uitstoot (gemiddeld 2% per jaar) moet dus snel omgebogen worden naar een daling.

Tabel 1 Mondiale effecten van temperatuurstijging. Bron: (PCCC, 2007)

Temperatuurstijging ten opzichte van 1990				
Effect op:	1-2°C	2-3°C	3-4°C	4-5°C
 Water	Honderden miljoenen mensen blootgesteld aan toegenomen waterstress			ca. 20% van de wereldbevolking heeft last van overstromingen
 Ecosystemen	Toename uitsterven amfibieën Toename koraalverbleking	20-30% van de soorten loopt groot gevaar om uit te sterven	Wijdverbreid afsterven koraal	Verdwijning van soorten
 Voedsel	Gewasopbrengst neemt af op lagere breedten en toe op hogere breedten		Adaptief vermogen van veel gewassen wordt op lagere breedten overschreden	
 Kusten	Toename schade door overstromingen en stormen	Miljoenen meer mensen lopen risico door overstromingen	30% verlies aan kust en wetlands	

3.2 Criteria voor duurzaamheid

In 2050 is de energievoorziening een stuk duurzamer geworden. Het begrip duurzame ontwikkeling is in 1987 gedefinieerd door de Commissie Brundtland:

Duurzame ontwikkeling is een ontwikkeling waarbij de huidige wereldbevolking in haar behoeften voorziet zonder de komende generaties te beperken om in hun behoeften te voorzien.

Deze definitie kan op vele manieren uitgelegd worden, maar men is het er over eens dat drie factoren een rol spelen: economie, milieu en sociale omstandigheden. In elk van deze factoren zitten weer veel aspecten die de duurzaamheid van een energietechnologie bepalen. In de lijst in dit hoofdstuk is een groot aantal van zulke duurzaamheidsaspecten verzameld. Het begrip duurzame energie wordt nogal eens gebruikt voor hernieuwbare bronnen, ofwel energiebronnen waarbij geen beslag wordt gelegd op eindige voorraden, met name zon, wind en biomassa. Uit de lijst hiernaast



Tabel 2 Aspecten van duurzame energie	
	Aspecten
Economie	
Energie efficiëntie	Gunstig effect op primair energiegebruik
Voorraden	Beschikbaarheid primaire bron
	Eindigheid primaire bron
	Invloed van grondstofkosten op energieprijs
	Behoefte aan andere voorraden (bijv. opslagcapaciteit, silicium)
Zekerheid	Locatie voorraden, importafhankelijkheid
	Diversiteit van bronnen
Betaalbaarheid	Kosten ten opzichte van andere technologieën
	Effect op internationale concurrentiepositie
	Kansen op kostendaling
Betrouwbaarheid	Steeds beschikbaar of fluctuerend?
	Beperkingen door beslag op capaciteit van koppelnetten
Economische activiteit	Relatie met andere economische activiteiten
	Effect op werkgelegenheid
	Kansen op ontwikkeling innovatieve activiteit
Milieu	
Klimaatverandering	Directe CO ₂ -emissies
	CO ₂ -balans over de hele keten
	Emissies van niet-CO ₂ broeikasgassen
Luchtkwaliteit	Emissie van NO _x , SO _x , deeltjes etc.
	Locatie van emissies (bijv. binnensteden)
Biodiversiteit	Landgebruik in kwetsbare gebieden
	Direct effect op dieren en planten
	Emissies naar bodem
	Bodemuitputting
Landschapsverandering	Ingrepen in landschap
	Horizonvervuiling
Waterkwaliteit	Emissies naar water
	Gebruik van water ('fossiel' water)
Lange-termijn effecten	Opslag van CO ₂ , nucleair afval
Sociaal	
Armoede	Invloed winning grondstoffen op welvaart in land van herkomst
	Invloed op lokale beschikbaarheid van voedsel
Arbeidsomstandigheden	Arbeidsomstandigheden bij winning grondstof
	Arbeidsomstandigheden bij bedrijven energietechnologie
Gelijkheid	Bijdrage aan brede beschikbaarheid energie
	Beschikbaarheid van energiebron voor toekomstige generaties
Veiligheid	Veiligheid van opwekking
	Veiligheid van winning grondstoffen
	Veiligheid van afvaltransport en -berging
	Misbruik door kwaadwillenden
Keuzevrijheid	Dwingende maatregelen/vermindering van keuzevrijheid



blijkt dat duurzame energie een veel breder begrip is. Als bijvoorbeeld de productie van biomassa ten koste gaat van het regenwoud of van de voedselvoorziening in ontwikkelingslanden, dan kan deze niet als duurzaam worden beschouwd.

Het is duidelijk dat de meeste belangrijke energietechnologieën niet aan alle duurzaamheidscriteria voldoen. Bij gebruik van fossiele grondstoffen worden voorraden uitgeput, kernenergie en CO₂-opslag belasten toekomstige generaties met

Tabel 3 De belangrijkste duurzaamheidscriteria
Effect op primair energiegebruik - Wordt er meer of minder energie gebruikt?
Eindigheid van de primaire bron - Is er een mogelijk voorraadprobleem?
CO ₂ -balans van de hele keten - Wordt er veel of weinig broeikasgas uitgestoten?
Landgebruik in kwetsbare gebieden en invloed op de lokale beschikbaarheid van voedsel
Veiligheid van afvaltransport en -berging

opgeslagen afval, windparken leiden tot ingrepen in het landschap en grootschalige energiebesparing zal leiden tot vermindering van de keuzevrijheid van individuele burgers. Toch wegen niet alle aspecten even zwaar. In tabel 3 staan de belangrijkste criteria, gehanteerd om te bepalen of een technologie of energiebron vanuit het perspectief van duurzame ontwikkeling wenselijk is of niet.

Het streven is een geheel duurzame energiehuishouding tot stand te brengen, maar deze wordt in

2050 nog niet bereikt. Windenergie, zonne-energie en energiebesparing voldoen grotendeels aan de belangrijkste criteria. Andere mogelijkheden, zoals het gebruik van aardolieproducten in transport of kolen zonder CO₂-opslag, zijn duidelijk niet duurzaam. Drie andere belangrijke keuzemogelijkheden - biobrandstoffen, elektriciteit uit kolen met CO₂-opslag en kernenergie - voldoen niet direct aan alle bovenstaande criteria. In hoofdstuk 6 wordt ingegaan op de voorwaarden waaronder ze toch uit duurzaamheidsoogpunt aanvaardbaar zijn.





4. Hoe kan een duurzame energiehouding er komen?

De vraag of een duurzame energiehouding er zal kunnen komen, kan op hoofdlijnen kort worden beantwoord. Het antwoord is dan: “ja, het is mogelijk, maar het zal een flinke verandering vergen in de wijze waarop beslissingen over energie worden genomen, niet alleen door overheden maar ook door gebruikers; er zal consistent en slagvaardig beleid voor nodig zijn, gericht op de lange termijn; er zullen successen moeten worden geboekt bij technologische ontwikkelingen; en last but not least zullen andere wereldregio’s ook in actie moeten komen”. Reductie van de uitstoot van broeikasgassen door bijvoorbeeld de VS, China, Brazilië en India is essentieel. Het proces zal ook na 2050 voortgezet moeten worden, omdat een echt duurzame energievoorziening niet in een paar decennia bereikt is.

Decennia lang is economische groei gepaard gegaan met groei van energiegebruik en verbruik van fossiele brandstoffen. Bij de benodigde ommezwaai zal vermindering van de uitstoot van broeikasgassen in veel meer beslissingen een rol moeten

spelen. Een aanpak die daartoe bijdraagt, hebben wij ROBUST genoemd: Realiseren van een Overkoepelende Broeikasgas Uitstootreductie Strategie, die overigens ook doelen rond voorzieningszekerheid kan dienen.



De hoofdelementen van de ROBUST-aanpak zijn:

- A. Vaststellen van *doelstellingen* op de lange termijn en operationalisering daarvan op de middellange termijn voor de uitstoot van broeikasgassen en voor voorzieningszekerheid – goedgekeurd en gedragen door alle belanghebbenden en afgewogen en afgestemd ten opzichte van andere beleidsgebieden (landbouw, interne markt, milieu, buitenlandse betrekkingen)
- B. Formuleren van een heldere *visie op de mix (het portfolio) van technologieën* nodig om deze doelen te bereiken; een R,D&D roadmap om de benodigde innovatie tot stand te brengen, en instrumenten en middelen om de benodigde R,D&D te realiseren
- C. Ontwikkeling van een *consistent pakket van beleidsinstrumenten* geënt op de ontwikkelingsstadia van technieken, zonder verstoring van de marktwerking, inclusief prikkels om minder efficiënte technieken uit bedrijf te nemen
- D. Instellen van *plafonds en normen*: strenge plafonds voor de uitstoot van broeikasgassen, heldere normen voor energiegebruik en duurzame energie die periodiek worden aangescherpt
- E. *Samenwerking en communicatie* tussen overheden, bedrijven en burgers bij R,D&D, markt-introductie van nieuwe technologieën, opbouw van nieuwe infrastructuur en overbrugging van weerstanden, leidend onder andere tot een stabiel investeringsklimaat
- F. Periodieke *evaluatie* van, en reflectie op deze aanpak om de bereikte resultaten te overzien en op basis hiervan de aanpak bij te stellen.
- G. *Internationale dimensie*: andere wereldregio's meekrijgen.

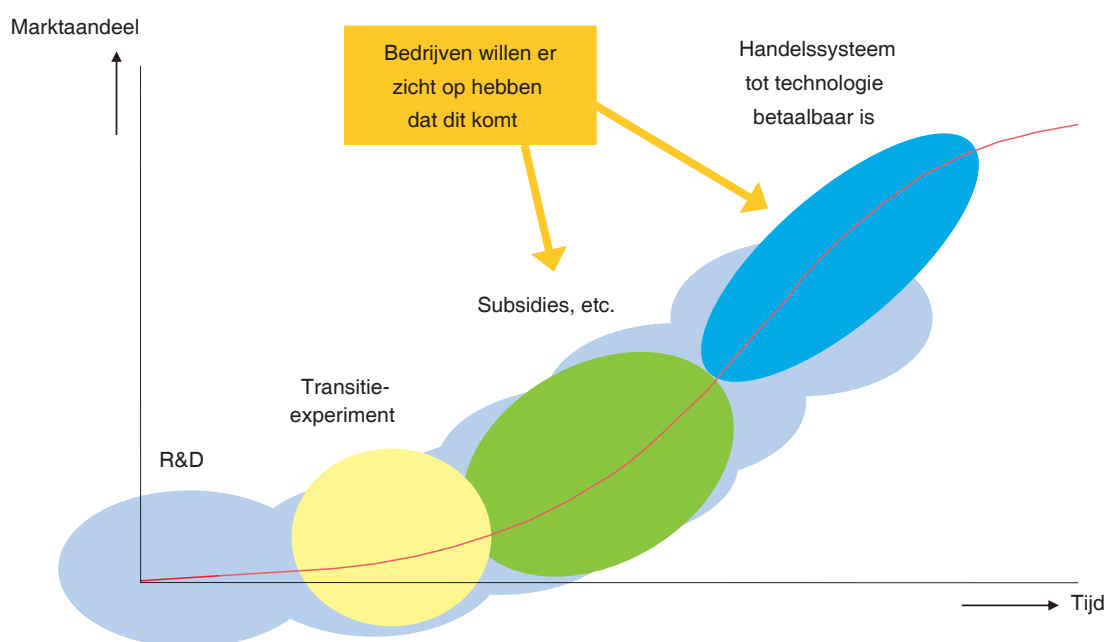
Voor onderdelen van het duurzame eindbeeld waarvan we zeker weten dat ze nodig zijn, kunnen afrekenbare doelstellingen ontwikkeld worden, vooral in de fase van marktintroductie. Het is nodig om deze doelstellingen op tijd te formuleren. Om een nieuwe technologie volwassen en concurrerend te maken is het nu eenmaal noodzakelijk dat er ervaring mee wordt opgedaan. Een voorbeeld van zo'n doelstelling is een Europees programma voor 100.000 waterstofauto's in 2020. Dit aantal is vereist om voldoende basis te hebben voor ervaren-



gen en daarop gebaseerde productverbeteringen, nodig voor verdere verovering van de markt. Ook internationale technology agreements kunnen voor dit doel een effectief instrument zijn; in zulke overeenkomsten worden per land productie- of implementatievolumes afgesproken van een bepaald type technologie.

Voor de transitie naar een meer duurzame energievoorziening is een uitgebalanceerd beleidspakket nodig. Bij elk stadium van marktrijpheid van een technologie hoort een ander soort beleidsinstrument. In eerste instantie is R&D-beleid nodig om een nieuwe innovatieve technologie te ontwikkelen. Vervolgens stimuleert de overheid demonstratieprojecten in verschillende markten, zodat men ervaring kan opdoen met nieuwe technologie ("niche accumulatie"). Het volgende stadium is het subsidiëren van technologie. Door schaalvergroting en andere leereffecten dalen de kosten van de technologie en moeten subsidies op termijn overbodig worden. Gelijktijdig is het nodig om achterblijvers, zoals gebruikers van onzuinige installaties, aan te pakken. Dit kan gebeuren door een in de loop van de tijd steeds strenger wordende normstelling.

Overheden moeten aan bedrijven duidelijkheid geven over de perspectieven op lange termijn van innovatieve technologieën. Dat kan door het formuleren van doelstellingen, en door het instellen van beleid voor een voldoende lange periode. In transitietermen draagt dit bij aan een stabiel regime - hoewel externe factoren (bijvoorbeeld de liberalisering van de elektriciteitsmarkt) ook belangrijk zijn. Het is cruciaal dat de private sector kan opereren in een helder en stabiel beleidskader dat de goede prijssignalen uitzendt. Een voorbeeld daarvan is een voldoende hoge en redelijk stabiele CO₂-prijs in de markt.



Figuur 11 Inzet van beleidsinstrumenten in de ROBUST aanpak

De noodzakelijke veranderingen komen alléén tot stand als alle betrokkenen zich van de urgentie bewust zijn en bereid zijn tot nieuwe vormen van samenwerking. Het transitieproces in Nederland is daarop gericht, maar dit moet nog veel meer geïntegreerd raken om effect te krijgen. Daarnaast moet worden gewerkt aan grotere samenhang van klimaatbeleid, energiebeleid, buitenlands beleid en R&D-beleid. Dit heeft weer effect op andere overheidsdoelstellingen (mobiliteit, landbouw, innovatie, industriebeleid, etc.); dit moet in kaart worden gebracht zodat keuzes goed afgewogen kunnen

worden. Hierdoor kan een stabiele en heldere omgeving worden geschapen, waarin investeringen in nieuwe technologieën en systemen worden uitgelokt. Als een bedrijfstak tegen problemen aanloopt bij toepassing van nieuwe duurzame technologieën, dan moet deze bij de overheid ook kunnen aankloppen voor overleg over oplossingen.

De overheid heeft ook een belangrijke rol bij het opzetten van nieuwe energie-infrastructuur zoals die voor CO₂-afvang en waterstof. Het is niet nodig dat de overheid zelf de investeringen doet, maar het is wel noodzakelijk dat goede voorwaarden worden geschapen voor opbouw van de infrastructuur door marktpartijen.

Besluitvaardigheid is van belang bij het beleid. Er gaan te vaak jaren overheen voordat beslissingen worden genomen. De tijdsconstanten van de energievoorziening zijn lang en vertragingen in de ombouw hebben daardoor grote gevolgen. Het is belangrijk om consequent vast te houden aan

robuuste keuzes en niet van koers te veranderen, hoewel er natuurlijk wel ruimte moet zijn voor nieuwe inzichten.

Ook is het belangrijk dat nieuwe initiatieven worden bekeken op hun invloed op het klimaatbeleid. Eén van de mogelijkheden bij transportbrandstoffen is bijvoorbeeld, deze te produceren uit steenkool ('coal to liquid'); maar hierbij wordt over de hele keten beschouwd de CO₂-uitstoot verdubbeld, vergeleken met benzine en diesel uit aardolie. Het afvangen van CO₂ kan wel bij de productie van de brandstoffen, maar niet bij de uitlaat van de auto. De overheid moet alert zijn op zulke ontwikkelingen en tijdig ingrijpen wanneer zulke initiatieven worden genomen.

De overheid moet steeds de vinger aan de pols houden om te zien welk beleid effectief is en welk beleid minder effectief. Op basis van zulke evaluaties kan het beleid worden aangepast en verbeterd.





5. Strategie-lessen

5.1 Het kan ook anders lopen

Wat als Europa er niet in slaagt om de ambities voor CO₂-emissiereductie in 2020 te verwezenlijken en voor de periode daarna te intensiveren? Afhankelijk van de ontwikkeling van de prijzen en beschikbaarheid van fossiele brandstoffen zijn verschillende ontwikkelingen mogelijk. In het kader hieronder wordt een beeld op hoofdlijnen geschetst. Uiteraard zijn er nog veel meer toekomstbeelden denkbaar.

“Hoge olie- en gasprijzen, voorzieningszekerheid bedreigd; geen klimaatbeleid”

In dit toekomstbeeld raken aardolie en aardgas sneller op hun retour. De rol van kolen neemt daardoor toe. Maar men slaagt er niet in, door toepassing van steenkool het hele tekort aan olie en gas op te vangen, waardoor het totale gebruik van fossiele brandstoffen lager uitvalt. De inzet van kolen voor elektriciteitsopwekking neemt toe. Verder wordt steenkool op grote schaal gebruikt in de industrie en voor de productie van trans-

portbrandstof. Aangezien de prijzen van fossiele energiedragers hoog zijn, is er een sterke prikkel voor energiebesparing en duurzame energie, voornamelijk voor de korte termijn oplossingen wind en biomassa, en voor kernenergie. Het tempo van energiebesparing is iets lager dan 1% per jaar. Kernenergie en windenergie worden gestimuleerd en krijgen een toenemend aandeel. Biomassa wordt ingezet om transportbrandstoffen te produceren en wordt ook meegestookt in elektriciteitscentrales. Ook de X to Y centrale (zonder CO₂-afvang) doet het in dit toekomstbeeld prima. In dit toekomstbeeld zijn er weinig aanpassingen aan de energieinfrastructuur. Wel zijn er meer faciliteiten om kolen en biomassa te verwerken, vooral nabij zeehavens. De CO₂-emissie is in 2050 10% hoger dan in 2000, de gevolgen van klimaatverandering worden merkbaar en zorgen voor grote sociale onrust.

Deze ontwikkeling van de energievoorziening is duidelijk minder duurzaam. Er kunnen talloze van zulke beelden worden ontwikkeld, gezien de

fundamentele onzekerheden in de factoren die de toekomst bepalen. De ervaring leert dat deze factoren niet goed te sturen zijn, waardoor de toekomst zowel meer positief als meer negatief kan uitpakken. Of er bijvoorbeeld daadwerkelijk een goed mondiaal klimaatbeleid van de grond komt, hangt af van ontwikkelingen in geopolitieke verhoudingen, de wil van landen om werkbare compromissen te sluiten, mogelijke rampen samenhangend met klimaatverandering, etc. En deze zaken zijn niet of nauwelijks te beïnvloeden. Toch kunnen sommige zaken wel worden gestuurd, namelijk via technologie en gedrag. Als duurzame energiebronnen ruim en betaalbaar ter beschikking komen, zal dat het in de vorige hoofdstukken geschetste beeld waarschijnlijker maken. Het ontwikkelen van de daarbij horende technologieën kan dus worden gezien als een “shaping strategy”, een strategie die een dergelijke ontwikkeling meer kansrijk maakt. Er kan ook voor worden gekozen, technologieën betaalbaar en beschikbaar te maken die de consequenties van negatieve ontwikkelingen beperken. Deze technologieën maken de negatieve ontwikkeling niet zo zeer minder waarschijnlijk, maar zorgen wel voor het indekken tegen de negatieve effecten daarvan. Zo’n strategie wordt wel een “hedging strategy” genoemd.

Ook aan de kant van technologische ontwikkeling kan het anders lopen dan in de voorgaande hoofdstukken voorzien. De kostendaling van zonnepanelen en wind kan nog voorspoediger verlopen. Misschien kan meer duurzame biomassa geïmporteerd worden dan voorzien. In dat geval kan de bijdrage van steenkool met CCS veel beperkter zijn, en sneller afgebouwd worden, of wordt het makkelijker om af te zien van de inzet van kernenergie. Het is ook mogelijk dat de levensduur en opslagcapaciteit van batterijen zó sterk verbetert dat elektrische auto’s, in plaats van brandstofcelvoertuigen, de nieuwe standaard worden in de transportsector.

Bovendien zullen zich bij verdergaande innovatie ongetwijfeld verrassingen voordoen. Niet alles is op het moment van schrijven al te voorzien. Misschien gaan kunstmatige fotosynthese, ‘blauwe energie’ (elektrische stroom door het gecontroleerd mengen van zout en zoet water), of kernfusie wel een deel van de energievoorziening verzorgen. Daarnaast is het mogelijk dat er een niet voorziene verrassing

optreedt. Anderzijds is het niet waarschijnlijk dat nu nog onbekende technologieën in 2050 al een hele grote bijdrage zullen leveren.

Om deze redenen moet bij technologische ontwikkeling altijd worden gekozen voor spreiding in een portfolio van technologieën. In zo’n energieonderzoeksportfolio moet ook op andere aspecten een balans bestaan, bijvoorbeeld tussen technieken waarvan op de korte termijn of de lange termijn een grote bijdrage wordt verwacht.

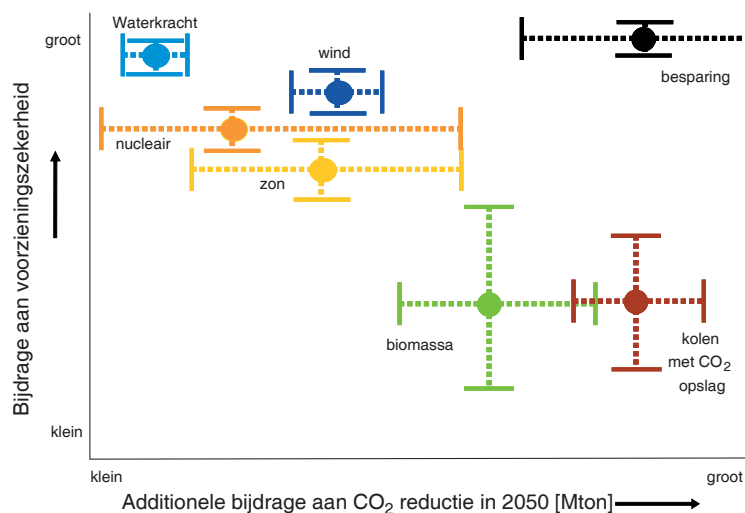


5.2 Wat betekent dit voor technologieonderzoek?

In Figuur 12 is van een aantal belangrijke technologieën hun bijdrage aan de terugdringing van CO₂-emissies, volgens het in hoofdstuk 2 gepresenteerde toekomstbeeld, uitgezet tegen hun bijdrage aan een grotere voorzieningszekerheid. Besparing is de optie die op beide fronten het best scoort: zowel een groot potentieel voor CO₂-reductie als voor importbeperking. Onderzoek aan energiebesparing beslaat een zeer breed terrein: vraagreductie door gedragsverandering, efficiencyverhoging in allerlei sectoren, beperken van energieverliezen door bijvoorbeeld isolatie, vervanging van oude installaties door nieuwe zuiniger systemen, integratie van systemen, recycling en hergebruik.

Elektriciteit uit zon en wind maken naar verwachting beide een enorme groei door in de periode tot 2050 en leveren dan een belangrijke bijdrage aan de energievoorziening. Het zijn beide technologieën waarbij slechts import van grondstoffen voor de apparatuur nodig is, hoewel bijvoorbeeld de aanvoer van kristallijn silicium een belangrijke risicofactor is in de ontwikkeling van PV-technologie. Verder kan het gebruik van zonne-energie ook importen met zich meebrengen, bijvoorbeeld in de vorm van elektriciteitsimport vanuit grootschalige PV- of CSP-centrales in Noord-Afrika. Zon en wind hebben beide als nadeel dat ze niet voortdurend beschikbaar zijn; dat maakt onderzoek naar elektriciteitsopslag noodzakelijk. Het potentieel van windenergie in Europa is vrij goed bekend; ruimtegebrek is de beperkende factor. Zonne-energie heeft een zeer groot potentieel, maar de groeisnelheid hangt sterk af van de kostenontwikkeling. Technologie-ontwikkeling en stimuleringsbeleid zijn dan ook gericht op kostprijsverlaging.

Twee andere energiebronnen met een groot potentieel zijn kolen (met CO₂-afvang en -opslag), en biomassa. Er zitten grote onzekerheden in het potentieel van deze bronnen, die te maken hebben met maatschappelijke acceptatie van CO₂-opslag en beschikbaarheid van biomassa. Voor zowel kolen als biomassa geldt dat in Europa een vrij groot potentieel is, maar voor beide energiebronnen zal ook import een grote rol gaan spelen. Biomassa kan in veel sectoren worden ingezet, maar toepassing in de transportsector en in de industrie liggen het meest voor de hand omdat er weinig alternatieven zijn in die sectoren. Ontwikkeling van technologie voor de zogenaamde tweede generatie biobrandstoffen (die niet meer worden geproduceerd uit voedingsmiddelen maar uit cellulose) is hierbij cruciaal, evenals het veiligstellen van een betrouwbare en duurzame productie van biomassa. Technologie voor de productie van elektriciteit of waterstof uit kolen met CO₂-afvang en -opslag is nog niet commercieel; de technologieontwikkeling is gericht op kostenverlaging. Ook het verzekeren van de betrouwbaarheid van voldoende opslagcapaciteit voor CO₂ is cruciaal voor deze technologie.



Figuur 12 Additionele bijdrage aan de CO₂-emissiereductie in 2050 t.o.v. 2007, het in hoofdstuk 2 gepresenteerde toekomstbeeld, versus de bijdrage aan voorzieningszekerheid van verschillende energiebronnen en -technologieën. De foutbalken geven de onzekerheid weer in de bijdrage aan CO₂-reductie en/of voorzieningszekerheid

De bijdrage van kernenergie aan de CO₂-emissiereductie is niet groot, omdat er in dit toekomstbeeld niet veel kerncentrales worden bijgebouwd: het gaat vooral om vervanging van bestaande centrales. De bijdrage van kernenergie aan de CO₂-reductie kan groter zijn bij een grotere maatschappelijke acceptatie van deze technologie in grote delen van Europa. De bijdrage aan de voorzieningszekerheid is groot: de hoeveelheid benodigd uranium is relatief klein en de voorraden liggen in relatief veilige landen als Canada en Australië. De technologie is al decennia op de markt, en er is nog steeds veel ontwikkeling gaande aan bijvoorbeeld intrinsiek veilige centrales en vermindering van de hoeveelheid van kernafval.

Bij het beschikbaar maken van nieuwe technologieën moet een aantal stadia worden doorlopen, zie ook Figuur 11:

- Technisch mogelijk maken.
Bij een aantal belangrijke toekomstmogelijkheden zijn de grondstoffen of technologieën op dit moment nog niet commercieel beschikbaar; andere technologieën zijn zelfs niet of nauwelijks het laboratorium ontgroeid. CO₂-afvang op grote

Het kan ook anders lopen...

Dubai, februari 2030.

Olieprijs bereikt historisch dieptepunt.
Gecorrigeerd voor inflatie bevindt de prijs zich nu onder het niveau van 1960. Analisten wijzen op de doorbraak van de elektrische auto als belangrijkste factor. De OPEC heft zichzelf op.

Den Haag, februari 2041.

Door de veranderde stroming door de vele windmolenparken in de Noordzee, zijn grote stukken van de kust van Nederland afgeslagen en zijn een nieuwe eilanden ontstaan tussen Nederland en Denemarken. Nederland heeft eilanden geclaimd en is van plan om van deze een vliegveld aan te leggen als compensatie van het door het water bedreigde Schiphol.

Sjanghai, 1 september 2023.

Met ingang van vandaag is in de Chinese stad Sjanghai met 30 miljoen inwoners alleen de brandstofcel toegestaan als aandrijving van vervoermiddelen. De lokale overheid heeft geïnvesteerd in een fijnmazig net van waterstofstations en subsidieert de aanschaf van brandstof-

Saoedi-Arabië treedt toe tot de associatie van windproducerende landen

..., augustus 2015.

Doordat CSP schaduw creëert in de woestijn, wordt er vocht aan de lucht onttrokken en naar de bodem gevoerd. Door deze lokale klimaatverandering is begroeiing ontstaan, en moeten de CSP-velden regelmatig gemaaid en gesnoeid worden. De extra biomassa die hierbij beschikbaar komt, vergroot het CSP-rendement. Het aantal banen in de Sahara regio is sterk gegroeid.

Middelburg, 2030. Exportpositie Nederland versterkt door Zeeuws uranium. Na de viering markt voor de uit Zeeuws kiet gewonnen uranium verder gegroeid. Dit is een opsteker voor de door wateroverlast geplagde provincie.

..., november 2025.
De terroristische aanslag met een lange staalkabel en het afgevoerde vrachtschip Otapan-II, is de nieuwbouw van windmolens op zee gestagneerd. Het blijkt onmogelijk een windmolenpark op te beschermen.

..., deze massamarkt op langere termijn een sterke daling in de prijs van brandstofcellen zal veroorzaken.

Groningen, 3 maart 2049. Oost-Groningen wordt geteisterd door aardbevingen veroorzaakt door bodemstijging. De aardbevingen - vannacht 2,4 op de schaal van Richter in Stedum - worden in verband gemaakt met de grootschalige opslag van CO2 in de lege Groningse gasvelden. Aan het eind van de twintigste eeuw veroorzaakte bodemdaling door aardgaswinning al aardbevingen in Groningen.

OSMOSECENTRALE BIJ DE DODE ZEE 30 JAAR IN BEDRIJF

Scheveningen, 27 mei 2049.

Het koraalrif voor de kust van Scheveningen is opgenomen in de lijst van beschermde ecosystemen volgens de HABITAT richtlijn. Sinds de opwarming van het zeewater en de plaatsing van een groot aantal windparken hier een bijzonder ecosysteem ontstaat, Excursies elke derde dinsdag van de maand "verzamelen in het informatiecentrum huis", net achter de dijk.

Amsterdam, juni 2033.

Zonnemiljardair uit Nigeria koopt Ajax
Ozman Dkouraitu - eigenaar van diverse grote zonnestroom centrales in Nigeria - heeft voetbalclub Ajax gekocht van de Arabische oliesjeik Mohammed Al Hazab. Dkouraitu is rijk geworden met de verkoop van zonnestroom aan Europa. Dit is al de vierde Europese voetbalclub die gekocht wordt door een miljardair uit Nigeria, dat enkele decennia geleden nog tot de allerarmste landen ter wereld behoorde.

Monte Carlo, 21 mei 2044.

Snel accu's laden beslist Grand Prix Monaco

De Ferrari van Michael Schumacher jr heeft de zesde Grote Prijs van het seizoen gewonnen dankzij de nieuwe snellaad-installatie van het team. De accu's die de elektromotoren in de wielen van de Ferrari van stroom voorzien werden in een niet eerder vertoonden volledig opgeladen.

schaal is bijvoorbeeld nog geen volwassen technologie. Hoewel de eerste generatie biobrandstoffen nu in een behoefte voorziet, is voor de grote doorbraak de tweede generatie, synthetische biobrandstoffen nodig. Voordat deze op de markt komen is nog veel R&D noodzakelijk.

- Kostenverlaging door R&D en leereffecten in de markt.

Sommige technologieën zijn nu beschikbaar, maar te duur. Zonne-energie en waterstofvoertuigen zijn goede voorbeelden. Om deze technologieën toch in de markt te zetten is stimuleringsbeleid onmisbaar, maar voor een grote doorbraak is een sterke kostenverlaging noodzakelijk. Hiervoor is vooral onderzoek nodig naar fabricage-technologie, beperking van het gebruik van dure grondstoffen, etc. Het kan gaan om stapsgewijze verbeteringen van bestaande technologie, maar ook om de ontwikkeling van nieuwe technologie. Een voorbeeld van dat laatste is de ontwikkeling van organische PV-panelen. Kostenverlaging wordt ook bereikt door ervaring op te doen met de technologie en schaalvoordelen te benutten. Er moet een markt ontstaan voor de nieuwe technologie. Elke technologie zal de fase naar grootschalige (en betaalbare) productie moeten doorlopen. Op tijd beginnen heeft daarom voordelen. Het is echter wel van belang, een technologie voldoende tijd te geven om het geleerde te verwerken zodat dit terugkomt in de volgende generatie en zich vertaalt in kostendaling. Een

uitgekiende combinatie van marktstimulering in combinatie met R&D-beleid is hierbij onontbeerlijk. Bij het realiseren van kostendaling is het verder van belang grondstofprijzen in het oog te houden en te zorgen dat nieuwe technieken niet te afhankelijk zijn van schaarse grondstoffen.

- Wegnemen van obstakels.

Ook technologie die al op de markt is, moet verder worden ontwikkeld. Kernenergie bijvoorbeeld wordt al decennialang commercieel toegepast. Toch zijn er obstakels voor uitbreiding, zoals het afvalprobleem en zorgen om de veiligheid van reactoren. Onderzoek en ontwikkeling vinden plaats op het gebied van inherent veilige centrales en centrales die veel minder hoogradioactief afval produceren (de zogenaamde Generatie IV centrales). Ook voor toepassing van CO₂-opslag bestaan obstakels, zoals onzekerheid over capaciteit en veiligheid van de opslaglocaties. Door geologisch onderzoek kunnen deze onzekerheden worden verkleind.

- Vergroten van het potentieel.

Bij veel energiebronnen die afhankelijk zijn van de aanvoer van brandstoffen (aardolie, steenkool, biomassa) wordt onderzoek gedaan naar het vergroten van de productie. Vooral bij biomassa zijn er grote onzekerheden in het potentieel en dit vereist veel onderzoek. Een ander voorbeeld is onderzoek naar mogelijke alternatieven voor grondstoffen als platina in brandstofcellen of koper in windturbines.



5.3 Kosten en baten

Gezien de omvang van het klimaatprobleem is het nodig om op een breed portfolio van technologieën in te zetten. Er is niet één tovermiddel om de energiehuishouding te verduurzamen; het zal moeten komen van een combinatie van diverse technologieën. Op die manier wordt ook het risico gespreid dat sommige technieken niet opleveren wat men er nu van verwacht. Het is nuttig om te kijken naar de kosten van specifieke technologieën. Het toekomstbeeld, zoals beschreven in hoofdstuk 2, kost per hoofd van de bevolking in 2050 enkele honderden euro's méér dan een niet-duurzaam toekomstbeeld. Dit bedrag wordt niet onttrokken aan de economie maar omvat een verschuiving van geldstromen. Verder staan er baten tegenover, zoals een verminderd risico op grote versturende effecten door klimaatverandering, een verminderde afhankelijkheid van import van olie en gas, en banen in diverse branches zoals de bouw, landbouw en bedrijven die schone energietechnologie produceren.

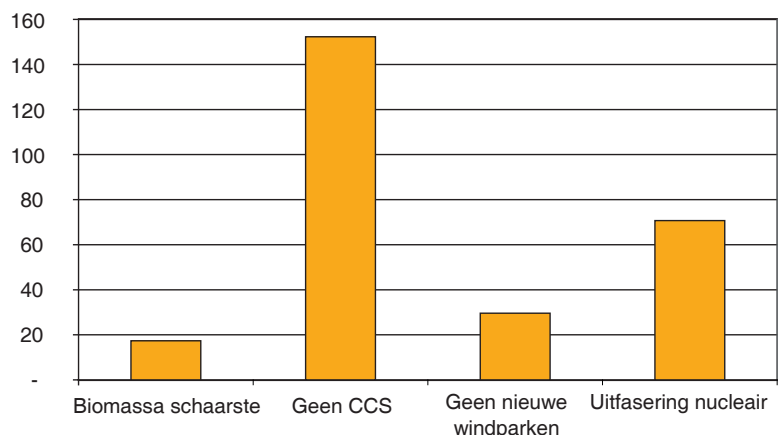
In Figuur 13 is een schatting weergegeven van de meerkosten van het uitsluiten van specifieke technologieën, vergeleken met het beeld uit hoofdstuk 2. Deze schatting geeft slechts een indicatie, omdat de toekomstige kostenontwikkeling van technologieën met onzekerheden omgeven is. Verder zijn deze inschattingen niet alleen afhankelijk van de kosten van de technologie, maar ook van de verwachte omvang van de bijdrage in 2050.

Allereerst is gekeken naar de consequenties van het niet beschikbaar zijn van CO₂-afvang en -opslag (CCS), bijvoorbeeld als gevolg van problemen rond het vinden van opslaglocaties. Dit verhoogt de kosten aanzienlijk, met zo'n € 150 miljard, omdat in 2050 ongeveer de helft van de CO₂-uitstoot afgevangen wordt. Als CCS niet beschikbaar is, dan moet deze CO₂-uitstoot op een andere manier voorkomen worden, door een grotere inzet van energiebesparing en duurzame energie.

Verder is het mogelijk dat de publieke opinie in Europa zich dusdanig ontwikkelt dat besloten wordt om kernenergie uit te faseren en geen nieuwe centrales te bouwen. In dit geval wordt, aangezien de gasprijzen hoog zijn, een groot aantal nieuwe kolencentrales gebouwd, uitgerust met CO₂-afvang. Ook zon en wind leveren dan een grotere bijdrage aan de elektriciteitsvoorziening. De extra kosten van dit scenario zijn zo'n € 70 miljard in 2050, en de elektriciteitsprijs stijgt erdoor met 25%.

Tenslotte: als er minder biomassa geïmporteerd kan worden stijgen de kosten navenant. Als er bijvoorbeeld 20% meer biomassa binnen Europa geteeld moet worden, dan stijgen de totale kosten met € 17 miljard. De kosten van het (theoretische geval) van het uitsluiten van nieuwe windparken zijn iets hoger, zo'n € 30 miljard.

[miljard euro]



Figuur 13 Meerkosten in het jaar 2050 van het uitsluiten van specifieke technologieën in Europa, vergeleken met het duurzame beeld in Hoofdstuk 2



6. Duurzaamheidscriteria voor kernenergie, CO₂-opslag en biomassa

Eerder in dit visiedocument hebben we aangegeven wat we onder duurzaamheid verstaan. Er zijn een paar technologieën waarvan de duurzaamheid regelmatig ter discussie staat. In dit hoofdstuk formuleren we daarom voorwaarden voor de toepassing van kernenergie, CO₂-afvang en -opslag, en biomassa in een duurzame energievoorziening.

6.1 Kernenergie

6.1.1 Achtergrond

Van de verschillende elektriciteitsproductietechnologieën levert op dit moment kernenergie met zo'n 30% de grootste bijdrage aan de Europese elektriciteitsvoorziening. In de wereld leveren ruim 400 kerncentrales aan het elektriciteitsnet. De groei van het aantal kerncentrales vindt nu voornamelijk plaats buiten Europa. Om de toekomstige bijdrage van kernenergie vanuit het gezichtspunt van een duurzame energievoorziening van Europa te bekijken, worden hieronder de duurzaamheidsaspecten van kernenergie besproken. De belangrijkste punten hierbij zijn de uraniumvoorraden, radioactief afval, de veiligheid van centrales en het risico van proliferatie.

6.1.2 Voorraden

De uranium voorraden moeten zo efficiënt mogelijk benut worden

Het huidige gebruik van uranium bedraagt circa 67 kton per jaar. De huidige bekende voorraden tegen een prijs van minder dan 130 \$/kg bedragen circa 4,7 miljoen ton, genoeg voor 70 jaar huidig gebruik (Redbook, 2006). Deze voorraden zijn wereldwijd gespreid met de belangrijkste voorraden in Australië, Canada en Kazakstan.

Tussen 1985 en 2005 was er gezien de lage uraniumprijs nauwelijks exploratie. Bij verdubbeling van de prijs¹ zullen de economisch winbare voorraden verveelvoudigen. Daarnaast zijn er nog onconventionele voorraden, zoals in zeewater (4000 miljoen ton).

¹ Een prijsstijging van \$50 per kg ruwe uranium leidt tot een kostprijsstijging van enkele tienden €/kWh

Onderzoeksprogramma's (4e generatie reactoren) zijn erop gericht het uranium tot 100 maal efficiënter te gebruiken. Daarnaast kan thorium, dat op zijn minst zoveel als uranium voorkomt in onze aardkorst, gebruikt kunnen worden voor de productie van splijtstof. De beschikbaarheid van splijtstof is daarom in principe geen knelpunt in de discussie rond de duurzaamheid van kernenergie.

Winning van grondstoffen moet zo veilig en milieuvriendelijk mogelijk gebeuren

De milieubelasting bij winning en verwerking van uranium is afhankelijk van het type mijnbouw, het beheer van de mijn en van de tailings (restproduct van de ertsverwerking). Uraniumerts kan ondergronds gewonnen worden of uit 'open-pit' mines, dus aan de oppervlakte, afhankelijk van de diepte van de ertslaag. Na winning in de mijnbouw, wordt het erts verbrokkeld of vermalen. Daarna wordt het met zuur behandeld om het uranium op te lossen. Uranium wordt uit de oplossing gewonnen. Daarnaast wordt de zogenoemde 'in situ leaching' toegepast, waarbij het erts ter plekke wordt opgelost in de ertslaag en daarna opgepompt naar de oppervlakte.

Tailings zijn radioactief. Het is mogelijk door een goede afdichting van de tailingreservoirs de milieubelasting te minimaliseren tot een niveau van natuurlijke emissies van radon uit de bodem.

Een duurzame winning van uranium moet zo milieuvriendelijk mogelijk gebeuren, hierbij is onder meer landschapsherstel een belangrijke voorwaarde. Daarom heeft 'in situ leaching' de voorkeur. Om milieuvriendelijkheid van uranium mijnbouw te garanderen moet deze voldoen aan internationaal geaccepteerde normen.

6.1.3 Afval

Omstreeks 2015 moet er een politiek besluit zijn over de definitieve opslag van het hoogradioactieve afval. Bij nieuwe centrales moet de eindberging geregeld zijn voordat met de bouw wordt gestart. Vanuit duurzaamheidsperspectief moet het afvalmanagement zo goed zijn dat er op elk moment minimale invloed is op mens en milieu. De uitdaging voor de berging van radioactief afval is: het deel van het materiaal dat gedurende lange tijd radioactief blijft gescheiden te houden van de biosfeer.

Naar de huidige stand van de techniek is alleen eindberging in de diepe ondergrond een financieel en technisch haalbare oplossing. Op dit moment is in Europa nog geen permanente berging van hoogradioactief afval gerealiseerd². In Nederland is er voor gekozen om het kernsplijttingsafval op te werken en daarmee circa 95% van het materiaal te recyclen. Het restant wordt in afwachting van definitieve berging opgeslagen bij de COVRA. Daarnaast wordt binnen Europa ook de directe cyclus toegepast waarin gebruikte splijtstof voorlopig wordt opgeslagen in of nabij de kerncentrale om, zodra dat kan, definitief te worden opgeborgen in een ondergrondse opslagvoorziening. Dit gebeurt onder andere in Zweden en Finland. Mogelijk komen in de toekomst geavanceerde technieken zoals partitioning en transmutatie beschikbaar. Hiermee kan de levensduur van het lang levend afval terug gebracht worden tot enkele honderden jaren. Verder onderzoek is nodig om deze oplossing op grote schaal toe te kunnen passen.

Politieke besluitvorming, liefst op Europees niveau, is noodzakelijk over de eindbestemming van het radioactief afval.



² In Finland en Zweden zijn deze in aanbouw.

6.1.4 Veiligheid

Tot 2030 moet veiligheid van nieuw te bouwen kerncentrales worden gegarandeerd door barrières, redundantie, passieve systemen en lange responstijd.

Kernreactoren zijn installaties met een grote hoeveelheid radioactief materiaal. De veiligheid wordt gewaarborgd door natuurlijke processen en het zogenoemde 'defence in depth' concept bestaande uit een aantal achtereenvolgende barrières en redundante veiligheidssystemen om, in geval van een ongeluk, verspreiding van radioactief materiaal te voorkomen. Door deze veiligheidsmaatregelen en een veiligheidsomhulling van de reactor wordt het risico van een reactorongeval en van lozingen van radioactiviteit naar de omgeving zeer klein. Bovendien is het nu bij nieuwe reactoren mogelijk om de reactor te koelen door middel van natuurlijke circulatie, zodat zelfs bij een ongeval de koeling in werking blijft. Daarnaast is er voor het geval van het smelten van de reactorkern een opvangsysteem onder de reactor aanwezig. Ook zijn er systemen die de responstijd³ verlengen. Hierdoor is de invloed van menselijk falen nog verder terug gebracht.

Vanaf 2030 moeten nieuwe kerncentrales voldoen aan het criterium: geen evacuatie buiten de poort
De ontwikkeling van de vierde generatie kernreactoren is ingezet om deze in 2030 commercieel leverbaar te maken. Aan deze kernreactoren zijn, naast excellentie in veiligheid en betrouwbaarheid, als veiligheidseisen gesteld: een zeer lage kans op kernbeschadiging en geen noodzaak voor een evacuatie buiten de poort van de kerncentrale.

6.1.5 Proliferatie

Proliferatie is het ongecontroleerd verspreiden van nucleaire technologie en materiaal voor militaire toepassing. Op dit moment zijn er problemen op het gebied van proliferatie met Noord-Korea en Iran: Noord-Korea heeft een kernwapen ontwikkeld en Iran wordt ervan verdacht een kernwapen te ontwikkelen.

Kernreactoren en de splijtstofcyclus worden dusdanig ontworpen dat het proliferatierisico beperkt is. Er blijft echter een proliferatierisico, dat los staat van Europese keuzes om al dan niet nieuwe kerncentrales te bouwen, al is het maar omdat er dit moment een wereldwijd overschot aan plutonium en hoog verrijkt uranium is. Daarom is de rol van internationale instituties en verdragen cruciaal.

Internationaal toezicht op splijtbaar materiaal uit kerncentrales en andere bronnen moet versterkt worden

Het civiele gebruik van kernenergie impliceert een proliferatierisico. Hoewel kerncentrales geen directe bijdrage leveren aan proliferatie, hebben installaties in de splijtstofcyclus zoals verrijkingsinstallaties en opwerkingsfabrieken wel die potentie. Splijtbaar materiaal kan in principe door staten met een corrupt regime zowel civiel als militair gebruikt worden. Daarom staan verrijkings- en opwerkingsinstallaties middels het Non-Proliferatie Verdrag onder internationaal toezicht door het IAEA. De reikwijdte van dit verdrag is echter beperkt, omdat landen als Pakistan en Israël het niet ondertekend hebben. Indien deze installaties en het splijtbaar materiaal in juridisch eigendom van een supranationaal orgaan gebracht zouden worden, bijv. door het upgraden van het IAEA tot een supranationale entiteit, zou het Non Proliferatie Verdrag meer inhoud krijgen. Dit wordt ook bepleit in IAEA verband. Het is aan de internationale politiek om dit tot stand te brengen.

Sinds de gebeurtenissen op 11 september 2001 is de aandacht voor terrorisme toegenomen. Het is voor terroristische organisaties praktisch onmogelijk om een kernwapen te ontwikkelen en te bouwen vanwege de grootte en complexiteit van de benodigde installaties. Wel is het gebruik van de zogenaamde 'dirty bomb' een bedreiging. Deze bom verspreidt radioactief materiaal met conventionele

Artist impression EPR in Finland



³ Tijd waarin geen menselijke handeling noodzakelijk is na het optreden van een ongeval.

explosieven. Dit radioactieve materiaal is echter moeilijk uit de splijtstofcyclus van een kerncentrale te halen en relatief eenvoudig uit andere bronnen, bijvoorbeeld uit de medische sector.

6.1.6 Vierde generatie kernreactoren

Om de ontwikkeling te bevorderen van kernenergie die voldoet aan deze duurzaamheidscriteria is het Generatie IV forum opgericht. Dit forum bestaat uit elf landen die een roadmap hebben gemaakt voor zes veelbelovende reactorconcepten. Het doel is, in 2030 commerciële reactoren op de markt te hebben en de stadia van conceptontwikkeling en demonstratie dan te hebben doorlopen.

Twee van de 4^e generatie concepten zijn open splijtstofcyclus reactoren, die efficiënt waterstof en elektriciteit zullen kunnen produceren (Zeer hoge temperatuur en Superkritisch water reactoren). Vier concepten zijn gesloten splijtstof cyclus reactoren (Natrium, Lood, Gas en gesmolten zout gekoelde reactoren). Deze reactoren worden ontworpen om optimaal gebruik te maken van splijtstof en om radioactief afval te recyclen. Niet alle reactoren zullen in dezelfde mate voldoen aan alle duurzaamheidsisen.

6.2 Kolen met CO₂-afvang en -opslag

6.2.1 Achtergrond

Afvang en opslag van CO₂ (CCS) leveren een belangrijke bijdrage aan de vermindering van CO₂-emissies in het beeld dat eerder is geschetst: in 2050 wordt er in Europa ongeveer evenveel CO₂ opgeslagen als uitgestoten. Gezien de kosten en de voorraden ligt toepassing van CCS bij kolen het meest voor de hand, maar deze technologie zou ook kunnen worden toegepast bij bijvoorbeeld biomassa. In zekere zin is CCS een typische hedging technologie: als er dan toch kolen gebruikt moeten worden, zorgt CCS ervoor dat de nadelen (in termen van CO₂-emissies) worden vermindert. Strikt genomen is CO₂-afvang en -opslag bij fossiele brandstoffen niet duurzaam, omdat bij de energievoorziening gebruik wordt gemaakt van eindige voorraden en toekomstige generaties worden opgezadeld met grote hoeveelheden opgeslagen CO₂. Bovendien vermindert toepassing van CCS het rendement van het gebruik van kolen en daarmee ook de voorzieningszekerheid. CCS is



een overgangstechnologie naar een echt duurzame energievoorziening. Na een groeiperiode zal CCS enkele decennia gebruikt worden en vervolgens worden afgebouwd. In 2050 zit CCS nog in de groeiperiode.

Hieronder wordt beschreven hoe steenkool met CCS op een voor ons acceptabele manier toegepast kan worden.

6.2.2 Duurzaamheid kolengebruik

Geïmporteerde kolen moeten in veilige mijnen gewonnen zijn

In de EU worden veel kolen geïmporteerd uit landen als Rusland, Kazachstan en Australië. De arbeidsomstandigheden zijn niet in al die landen gewaarborgd en ook vindt er bij dagmijnbouw soms aantasting van het landschap plaats. De kolen die in Europa gebruikt worden moeten afkomstig zijn uit mijnen waarbij de veiligheid maximaal is en de aantasting van het landschap minimaal. Ook moet zorgvuldig worden gekeken naar mensenrechten, arbeidsomstandigheden en milieueffect.

De efficiëntie van omzetting dient zo hoog mogelijk te zijn

De voorraden steenkool zijn groot, maar niet onuitputtelijk. De efficiëntie van de omzetting van kolen naar elektriciteit moet zo hoog mogelijk zijn. Met het gebruik van huidige CO₂-afvang technologie daalt het rendement van een kolencentrale met meer dan 10 procentpunt. Door ontwikkeling van nieuwe technologie moet die zogenaamde efficiency penalty in 2050 veel kleiner zijn. Deze nieuwe CO₂-afvang technologie wordt dan toegepast in centrales met veel hogere rendementen dan de huidige kolencentrales. Het rendement van de centrale met CO₂-afvang moet meer dan 45% zijn.

6.2.3 Duurzaamheid en veiligheid van CO₂-transport en -opslag

Opslaglocaties zijn veilig en lekken minder dan 0,01% per jaar

De belangrijkste mogelijkheden voor CO₂-opslag zijn lege olie- en gasvelden en ondergrondse zoutwaterhoudende poreuze gesteentelagen (saline aquifers). Vooral van de laatste categorie is de opslagcapaciteit in Europa zeer groot.

De risico's bij opslag zijn het langzaam weglekken van CO₂ en het snel vrijkomen van CO₂ in bewoonde omgeving.

Langzaam lekken van CO₂ uit opslagreservoirs zou CO₂-opslag minder efficiënt maken. De maximale lekkage uit de opslag moet op 0.01% per jaar worden gesteld. Volgens het recente special report van de IPCC voldoen er waarschijnlijk voldoende reservoirs aan deze strenge eis. De aquifers moeten aan allerlei voorwaarden voldoen om geschikt te zijn als opslaglocatie. Uitgebreide geologische scanning van de opslagruimtes is een vereiste. Eén van de risico's is dat CO₂ langzaam uit een ondergronds reservoir in een meer lekt en zich ongemerkt op de bodem gaat verzamelen; dit moet worden uitgesloten. Verder is monitoring van de met CO₂ gevulde opslag noodzakelijk.

Het snel vrijkomen van een grote CO₂-wolk is een risico voor mensen en dieren. Bij windstil weer kan zo'n wolk blijven hangen en voor verstikking zorgen. Plotseling vrijkomen uit een uit poreus gesteente bestaand geologisch reservoir is niet mogelijk. Bij lege gasvelden ligt dit anders; ze zijn in principe dicht omdat ze al miljoenen jaren aardgas hebben vastgehouden, maar lekkage zou kunnen optreden via boorgaten. Er is echter technologie beschikbaar om lekken snel te detecteren en het ontsnappen van grote hoeveelheden gas te voorkómen. Bij het transport van brandbare gassen als aardgas en waterstof is hiermee veel ervaring opgedaan.

Transport van CO₂ met zo min mogelijk risico's
Afgevangen CO₂ zal via pijpleidingen naar de opslagplaats worden vervoerd. Deze pijpen zullen onvermijdelijk door dichtbevolkte gebieden lopen. Ook hier is het plotseling vrijkomen van een grote CO₂-wolk een risico, dat kan worden tegengegaan door goede detectieapparatuur.



6.3 Biomassa

6.3.1 Achtergrond

Biomassa is een kansrijke energiebron, veelzijdig in toepassing en veelzijdig door een rijke verzameling aan grondstoffen. Bovendien is biomassa direct toepasbaar. Daar staat tegenover dat er altijd vraagtekens zijn over de duurzaamheid van biomassa, vooral als gekeken wordt naar de volledige keten, van teelt tot eindgebruik. Er is grote onzekerheid over het potentieel, de hoeveelheid biomassa die in de toekomst beschikbaar is voor energiedoeleinden. Voor Europa geldt bovendien dat er waarschijnlijk biomassa geïmporteerd moet worden uit andere delen van de wereld. Dat is nu al het geval.

6.3.2 Duurzaamheid van de biomassaproductie

Biomassateelt mag de biodiversiteit niet schaden
Bij teelt van biomassa kan de biodiversiteit aangetast worden als daarbij bijvoorbeeld tropische regenwouden of oerbossen plaats moeten maken voor grootschalige plantages. Dit kan ook consequenties hebben voor de (beschermde) diersoorten in zulke gebieden. Dat geldt in het bijzonder voor ontwikkelingslanden. Om aantasting van biodiversiteit te voorkomen is informatie nodig over veranderingen in landgebruik. Daarbij is er een verschil tussen directe en indirecte veranderingen, wat het monitoren lastig maakt. De keuze van een peiljaar is daarbij ook relevant. Het is uit duurzaamheid oogpunt het beste om biomassa te telen op land dat voorheen braak lag of voor andere teelten werd gebruikt.

De teelt van biomassa mag geen schadelijke milieueffecten hebben

Bij de teelt van biomassa voor energiedoeleinden kan net als bij andere landbouwgewassen kunstmest of bestrijdingsmiddelen gebruikt worden. Dit kan schadelijk zijn voor het milieu. Het (overmatig)

gebruik van kunstmest heeft gevolgen voor de broeikasgasbalans van biomassa (zie verder). Andere risico's zijn het uitputten of verdrogen van de bodem. Houtachtige gewassen doen een groter beroep op het grondwater, omdat hun wortelstelsel dieper is. Daarnaast kan, afhankelijk van de locatie, erosie optreden. In de conventionele landbouw bestaan internationale richtlijnen voor 'good agricultural practice' die doorgaans ook op de teelt van biomassa van toepassing zullen zijn.

Gebruik van bio-energie mag niet ten koste gaan van beschikbaarheid en betaalbaarheid van voedsel of materialen

De flexibiliteit van biomassa als grondstof voor voedsel, materialen en energietoepassingen heeft vele voordelen. Een nadeel is echter dat de biomassa gebruikt zal worden voor de toepassing waarvoor het meest betaald wordt, wat verstoring van markten en ongelijkheid tussen Westerse en ontwikkelingslanden kan veroorzaken. Momenteel leidt de sterk groeiende vraag naar biomassa voor energietoepassingen tot schaarste en prijsstijgingen voor voedselgewassen. Zo is in 2006 de prijs van tortilla's in Mexico verdubbeld, onder meer als gevolg van de sterk gestegen vraag naar maïs als basis voor Amerikaans bioethanol, en voor veevoer in Azië. Aangezien de tweede generatie biobrandstoffen (op basis van houtachtige gewassen) veel minder concurreert met voedselvoorziening en een grotere energieopbrengst per hectare heeft, wordt aanbevolen zo snel mogelijk hierop over te schakelen.

Onder biomassa vallen ook vele reststromen (afval, mest) voor zover die van organische oorsprong zijn. Het gebruik van reststromen brengt weer andere dilemma's met zich mee. Hoewel het nuttige gebruik van afval of mest natuurlijk te verkiezen is boven lozing, neemt dit een prikkel weg om de hoeveelheid afval te reduceren. Daarnaast kunnen ook hier markten verstoord worden, indien reststromen voor energie gebruikt gaan worden waarvoor ook een meer hoogwaardige toepassing bestaat, bijvoorbeeld in het geval van spaanplaat.

De teelt van biomassa mag geen negatief effect hebben op welvaart en welzijn in het land van herkomst

De teelt van biomassa moet een positief effect heb-

ben op de lokale economie. Bij welzijn gaat het om arbeidsomstandigheden van werknemers, mensenrechten, eigendoms- en gebruiksrechten, sociale omstandigheden, en integriteit, bijvoorbeeld het tegengaan van corruptie.

Voorwaarden productie

Deze duurzaamheidscriteria zijn in de praktijk lastig te operationaliseren. Gestreefd moet worden naar internationale certificering van biomassa, inclusief niet-energetische toepassingen. Daarnaast heeft biomassa die geteeld is in Europa wellicht de voorkeur, omdat biomassateelt in ontwikkelingslanden meer duurzaamheidsrisico's oplevert, en moeilijker te monitoren is. Ook zal naar verwachting de wereldwijde vraag naar biomassa toenemen, met opwaartse prijsdruk als gevolg, en zal Europa daarom niet al te zeer afhankelijk willen zijn van biomassaproductie elders.

6.3.3 Duurzaamheid van de keten: broeikasgasbalans

Energietoepassingen van biomassa moeten (op lange termijn) minstens 70% minder broeikasgasemissies leveren dan de fossiele referentie

Bio-energie kan in principe koolstofneutraal zijn, dat wil zeggen dat de koolstof die vrijkomt bij verbranding of vergassing van de biomassa eerder geabsorbeerd is geweest bij de teelt. In de keten van teelt, oogst, transport en omzetting kunnen wel bijkomende emissies van broeikasgassen ontstaan.



Er zijn grote verschillen tussen ketens, en binnen ketens. Speciale aandacht is er voor het gebruik van kunstmest bij de teelt, want hierbij kunnen aanzienlijke hoeveelheden van het broeikasgas N_2O in de atmosfeer terecht komen. Ook is het belangrijk of landbouwafval nog nuttig gebruikt kan worden. Bij verbranding van biomassa ontstaan fijn stof, SO_x en NO_x maar bij vergassing van biomassa kunnen verzurende en verontreinigende stoffen al in het vergassingsproces worden verwijderd. Afhankelijk van de zuiverheid van de biomassa kunnen er dan wel vervuilde residuen overblijven.

6.3.4 Potentieel: is er voldoende biomassa?

De schattingen van het potentieel voor bio-energie lopen sterk uiteen omdat ze bepaald worden door verschillende, stuk voor stuk onzekere, factoren:

- Bevolkingsgroei en economische groei, het dieet, vooral de hoeveelheid vlees daarin, en de consequenties voor de vraag naar voedsel
- De intensiteit van de landbouw
- Ontwikkelingen in het landgebruik. Komen er tot dusver onbenutte gebieden beschikbaar, en in hoeverre wordt biomassa geteeld voor niet-energetische toepassingen?

In Tabel 4 wordt een inschatting gegeven van het wereldwijde potentieel voor biomassa, waarbij de marges gebaseerd zijn op IPCC scenario's met verschillende aannames over bevolkingsgroei, dieet en snelheid van technologische ontwikkeling.

In de kwantitatieve onderbouwing van deze Energievisie is gebruik gemaakt van een studie naar het technisch haalbare potentieel voor bio-energie in EU-25 zonder de milieudruk te vermeerderen (EEA, 2006). Dit potentieel wordt geschat op 12 EJ per jaar, waarvan 35% bestaat uit reststromen. Vergeleken met de potentiëlen in Tabel 4 is dit erg voorzichtig.

6.3.5 Duurzaamheid van gebruik van biomassa

Aan de gebruikskant moeten prioriteiten worden gesteld voor de toepassing van biomassa. Het grootste CO_2 -effect heeft biomassa bij gebruik in de elektriciteitsopwekking. Daar staat tegenover dat er meerdere mogelijkheden zijn voor het verminderen van de emissies bij elektriciteitsproductie, terwijl de mogelijkheden in de transportsector beperkt zijn. Daarnaast leveren biobrandstoffen in de transportsector direct een bijdrage aan het verminderen van de olieafhankelijkheid. Dit geldt vooral voor de 2^e generatie biobrandstoffen, omdat deze een betere CO_2 prestatie hebben en ook minder beslag leggen op landbouwgrond. Op de lange termijn kan in de transportsector overgeschakeld worden naar biowaterstof, toegepast in brandstofcelauto's. Dankzij de grote efficiency van de brandstofcel levert dit het grootste rendement op in termen van gereden kilometers per hectare. Voor vrachtverkeer geldt dit waarschijnlijk minder; hier blijft biodiesel op de lange termijn overheersen. Het Fischer Tropsch proces voor productie van biodiesel heeft als voordeel dat de eerste stap in het proces (vergassing van biomassa) ook gebruikt kan worden voor waterstofproductie.

Tabel 4 Realistische biomassa potentiëlen in 2050

	Biomassa energieteelt ^a [EJ _{prim} /yr]	Biomassa reststromen ^b [EJ _{prim} /yr]
Wereld	147-447	53-73

^a Bron: Hoogwijk, 2004, onder de aanname dat het realistisch potentieel dat deel van het technisch potentieel is, waarvan de productiekosten onder de 4\$/GJ liggen.

^b Bron: Smeets et al, 2004.

Referenties

- Brundtland, G.H., et al. (1987): Our Common Future. Report of the World Commission on Environment and Development. UN General Assembly Resolution 42/187, 11 December 1987.
- Damen, K., A. Faaij and W. Turkenburg (2006): Health, safety and environmental risks of underground CO₂ storage - overview of mechanisms and current knowledge. *Climate Change* 2006, 74, pp. 289-318.
- EEA (2006): How much bio energy can Europe produce without harming the environment? European Environment Agency, Copenhagen, 2006.
- Frei, C. (2004): The Kyoto protocol - a victim of supply security? or: if Maslow were in energy politics. *Energy Policy* 32, 1253-1256, juli 2004.
- Hoogwijk, M.M. (2004): On the global and regional potential of renewable energy sources. Proefschrift Universiteit van Utrecht, maart 2004.
- IEA (2006): Key World Energy Statistics.
- IPCC (2007a): IPCC Working Group I fourth assessment report 'The Physical Science Basis', 2007.
- IPCC (2007b): IPCC Working Group II fourth assessment report 'Impacts, Adaptation and Vulnerability', 2007.
- IPCC (2007c): IPCC Working Group III fourth assessment report 'Mitigation of Climate Change', 2007.
- Kavalov, B. and S.D. Peteves (2007): The Future of Coal. European Commission Joint Research Centre, EUR 22744 EN, February 2007.
- Nuclear Energy Agency and International Atomic Energy Agency (2006): Redbook, Uranium 2005: Resources, Production and Demand. Paris, 2006.
- PCCC (2007): Het IPCC-rapport en de betekenis voor Nederland. R. van Dorland, en B. Jansen (red.), uitgave PCCC, De Bilt/Wageningen.
- SNE-TP (2007): The sustainable nuclear energy platform, a vision report, 2007.
- Nuclear Energy Agency and International Atomic Energy Agency (2006): Redbook, Uranium 2005: Resources, Production and Demand. Paris, 2006.
- Smeets, E., et al. (2004): A quickscan of global bio-energy potentials to 2050. An analysis of the regional availability of biomass resources for export in relation to the underlying factors. Rapport NWS-E-2004-109, ISBN 90-393-3909-0, maart 2004.

Lijst met afkortingen

boe	Barrel of oil equivalent
CCS	CO ₂ capture and storage (CO ₂ -afvang en -opslag)
CO ₂	Kooldioxide
CSP	Concentrated Solar Power (thermisch-elektrische zonne-energie)
EPR	European Pressurized Reactor
HTR	Hoge temperatuurreactor
IAEA	Internationaal Atoomenergie Agentschap
ICT	Informatie en Communicatie Technologie
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
NOx	Verzamelnaam voor verschillende stikstofoxiden
PV	Photovoltaïsch
R,D&D	Research, Development and Demonstration
ROBUST	Realiseren van een Overkoepelende Broeikasgas Uitstootreductie Strategie.
SNG	Synthetic Natural Gas (synthetisch aardgas)
WKK	Warmtekracht koppeling

Lijst van tabellen

Tabel 1	Mondiale effecten van temperatuurstijging. Bron: (PCCC, 2007)
Tabel 2	Aspecten van duurzame energie
Tabel 3	De belangrijkste duurzaamheidscriteria
Tabel 4	Realistische biomassa potentiëlen in 2050
Tabel 5	Energieprijzen in het duurzame beeld
Tabel 6	Ontwikkeling van investeringskosten van nieuwe technologieën
Tabel 7	Energieprijzen in het referentiescenario

Lijst van figuren

Figuur 1	Primair energieverbruik in Europa in 2000 en in het duurzame beeld in 2050
Figuur 2	CO ₂ -emissies en -afvang per sector in Europa
Figuur 3	Woning die gebruik maakt van zonne-energie
Figuur 4	Personenauto's en brandstoffen in Europa
Figuur 5	De belangrijkste aangrijpingspunten voor energiebesparing en CO ₂ -emissiereductie in de industrie
Figuur 6	Elektriciteitsproductie in Europa
Figuur 7	De energiebehoefte piramide (Frei, 2005)
Figuur 8	Voorraden van olie, kolen en gas in verschillende regio's. Bron: BP data
Figuur 9	BNP en energieverbruik per hoofd van de bevolking in de EU-15 (Bron: IEA)
Figuur 10	Energiegebruik en CO ₂ -emissie per inwoner in een aantal landen in 2004. Bron: Key World Energy Statistics, IEA, 2006
Figuur 11	Inzet van beleidsinstrumenten in de ROBUST aanpak
Figuur 12	Bijdrage aan de CO ₂ -emissiereductie in 2050 t.o.v. 2007, het in hoofdstuk 2 gepresenteerde toekomstbeeld, versus de bijdrage aan voorzieningszekerheid van verschillende energie bronnen en -technologieën. De foutbalken geven de onzekerheid weer in de bijdrage aan CO ₂ -reductie en/of voorzieningszekerheid
Figuur 13	Meerkosten in het jaar 2050 van het uitsluiten van specifieke technologieën in Europa, vergeleken met het duurzame beeld in Hoofdstuk 2
Figuur 14	Modellering oliepiek in Europa

BIJLAGE: Aannames voor kwantitatieve onderbouwing

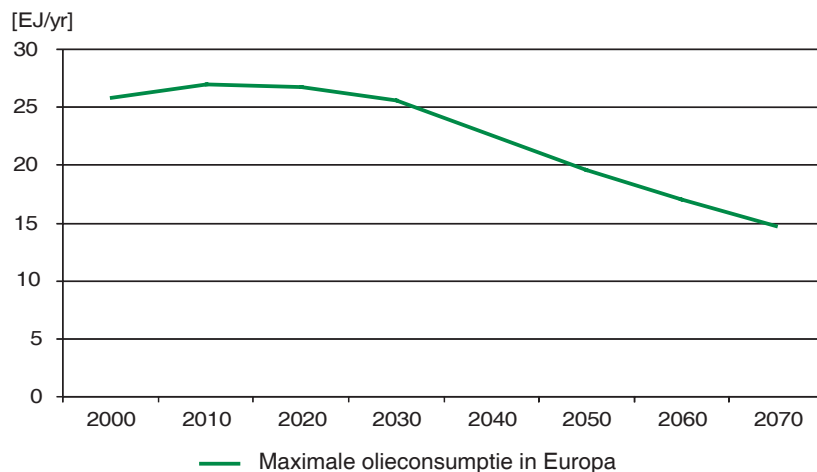
Voor een onderbouwing van het duurzame beeld is gebruik gemaakt van het energiemodel MARKAL. De database die hiervoor gebruikt is, is ontwikkeld in het EU project CASCADE MINTS Part 1 en is een weergave van de West-Europese energiehuishouding (EU15, Noorwegen, Zwitserland en IJsland).

Prijzen en beschikbaarheid van fossiele brandstoffen

De onderstaande brandstofprijzen zijn gebruikt. Deze zijn afkomstig van het POLES model en zijn gebaseerd op een scenario waarin toenemende CO₂-belasting wordt geheven, oplopend van ongeveer 10 €/ton CO₂ in 2000 tot 85 €/ton CO₂ in 2050.

\$/2005/vat	2000	2030	2050
Olie	27	61	97
Gas (Europe)	19	49	73
Kolen (Europe)	10	18	23

Verondersteld is ook dat er in Europa rond 2015 een oliepiek plaatsvindt, waardoor de olieconsumptie daarna afneemt. De ondergrens voor olieconsumptie is afgeleid van de IEA World Energy Outlook 2006. Daarnaast is aangenomen dat in 2070 ongeveer de helft van de hoeveelheid in 2020 gewonnen kan worden. Tussen 2030 en 2070 is geïnterpoleerd.



Figuur 14 Modelling oliepiek in Europa

Klimaatbeleid

Het klimaatbeleid heeft tot doel de CO₂-emissies in 2050 met 60% terug te brengen ten opzichte van de emissies in 1990. Elke sector moet minstens 30% van haar emissies reduceren, terwijl het model bepaalt waar de resterende reductie, tegen minimale kosten, behaald wordt.

Biomassa

In de kwantitatieve onderbouwing van de Energievisie is gebruik gemaakt van een studie naar het technisch haalbare potentieel voor bio-energie in EU-25 zonder de milieudruk te vermeerderen (EEA, 2006).

Dit potentieel wordt geschat op 12 EJ per jaar, waarvan 35% bestaat uit reststromen. In principe wordt de biomassa import zo gemodelleerd dat biomassa import de hoeveelheid van 10 nieuwe lidstaten van de Europese Unie niet mag overschrijden.

Kernenergie

De toekomstige ontwikkeling van kernenergie is onzeker, omdat de maatschappelijke acceptatie hierin een belangrijke rol speelt. In dit visiedocument is ervan uitgegaan dat de Europese landen hierin niet allemaal dezelfde keuzes maken. De nucleaire capaciteit in Europa is gelijk aan de huidige capaciteit (in absolute zin). Dit is in lijn met de visie van het Europese Technology Platform voor kernenergie (SNE-TP, 2007).

Kostenontwikkeling

Voor het inschatten van de kostenontwikkeling is gebruik gemaakt van leercurves. De zogenoemde progress ratio bepaalt de kostendaling na elke verdubbeling van geïnstalleerde capaciteit. Bij een progress ratio van bijvoorbeeld 0,9 dalen de kosten met 10%.

	Progress ratio	Investeringskosten [€/kW] startjaar			
		2000	2010	2020	2050
Wind op land	0,90	1200			750
Wind op zee	0,90	2100			1250
Zon PV	0,82	6050			1600
Concentrated Solar Power	0,93	2600			1200
Brandstofcel in transport	0,81		3500		50
H ₂ opslagtank in auto's	0,90		3		1
CO ₂ -afvang bij kolenvergassing (post combustion)	0,90			700	500
CO ₂ -afvang bij kolenvergassing (pre-combustion)	0,90			300	270

Referentiescenario

Omdat energiebesparing één van de speerpunten is van een duurzame energievoorziening, is het model met een elastische vraag doorgerekend. Hiermee kan vraagreductie als effect van hoge brandstofprijzen en hoge CO₂-prijs bekeken worden.

Voor het bepalen van de hoeveelheid energiebesparing is een referentie run nodig. In dit referentie scenario worden lage brandstofprijzen gehanteerd (zie de tabel) en een minimaal klimaatbeleid (10 €/ton CO₂).

\$ ₂₀₀₅ /vat	2000	2030	2050
Oil	27	36	39
Gas	17	29	33
Coal	9	11	11

ECN
Westerduinweg 3
Postbus 1
1755 ZG Petten
Telefoon 0224 564949
Fax 0224 564480
Email corp@ecn.nl

