

ENERGIE WORDT GOEDKOPER

INNOVATIE MAAKT DE ENERGIETRANSITIE
RENDABEL

Door André Faaij en Ruud van den Brink, maart 2019



ECN



innovation
for life

ENERGIE WORDT GOEDKOPER

INNOVATIE MAAKT DE ENERGIETRANSITIE
RENDABEL

› De energietransitie en het klimaatbeleid zorgen voor veel maatschappelijk debat. Delen van de samenleving gaat het allemaal veel te langzaam, anderen maken zich grote zorgen over de kosten van de omschakeling naar duurzame energie. Er is echter ook een ander perspectief: de kosten van de energietransitie voor de Nederlanders kunnen omlaag en de opbrengsten kunnen omhoog als we deze transitie slim aanpakken.

In deze paper zetten wij uiteen dat de kosten van de energietransitie positief zijn te beïnvloeden door doelgerichte innovatie en een goed gecoördineerde aanpak. Ook zijn er aanzienlijke baten voor de economie en voor de maatschappij van de energietransitie te verwachten die het totale kostenplaatje en de kosten-baten balans sterk beïnvloeden.

INHOUDSOPGAVE

INLEIDING EN ACHTERGROND

5

I. INNOVATIE MAAKT DE ENERGIETRANSITIE AANZIENLIJK GOEDKOPER

6

II. DE ENERGIETRANSITIE WORDT GOEDKOPER DOOR GEDEGEN ANALYSES EN EEN SLIMME, INTEGRALE AANPAK

8

III. DE ENERGIETRANSITIE VERSTERKT DE NEDERLANDSE ECONOMIE

11

IV. DE ENERGIETRANSITIE DRAAGT BIJ AAN EEN GEZONDER EN ECONOMISCH STABIELER NEDERLAND

13

CONCLUSIE

14

REFERENTIES

15

INLEIDING EN ACHTERGROND

De energietransitie is in volle gang en vraagt grote investeringen in nieuwe, duurzame energieproductiecapaciteit, in energie-transportinfrastructuur en in het verduurzamen van de gebouwde omgeving, industrie, land- en tuinbouw en mobiliteit. De transitie naar een CO₂-vrije energievoorziening raakt alle sectoren van de samenleving en veel veranderingen hangen met elkaar samen. De enorme versnelling die nodig is om de vergaande CO₂-reductieopgave te halen vraagt om een systeemverandering.

Gericht investeren in innovatie kan zowel de kosten van energietransitie reduceren als zorgen voor economische en maatschappelijke baten

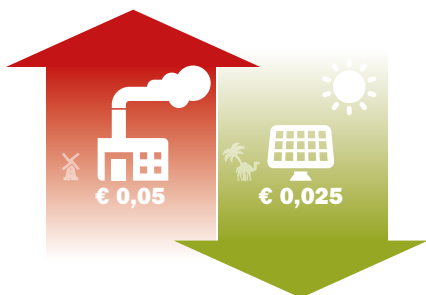
De doorrekening van de voorstellen uit de klimaattafels laat zien dat de doelen voor 2030 alleen haalbaar zijn als alles op alles wordt gezet. In de afgelopen maanden is vooral het beeld ontstaan dat de energietransitie significante kosten met zich meebrengt, met mogelijk negatieve gevolgen voor economische groei en besteedbare inkomens. Het akkoord gaat vergezeld van een integrale kennis- en innovatieagenda (IKIA), waarin nog eens honderden technologieën en thema's bijdragen aan een aantal op verduurzaming gerichte missies. De IKIA heeft echter weinig aandacht voor de integratie en samenhang en de financiering van vaak langer lopende innovatietrajecten is nog zwak en onzeker. Wat TNO betreft zou innovatie een veel prominenter

plaats moeten krijgen in het energie- en klimaatbeleid. Gericht investeren in innovatie kan zowel de kosten van de energietransitie aanzienlijk reduceren, alsmede zorgen voor substantiële (macro-)economische en maatschappelijke baten. Innovatie is tevens nodig voor het behouden en verkrijgen van maatschappelijk draagvlak, het faciliteren van nieuwe spelers en creëren van nieuwe bedrijvigheid in voor de transitie belangrijke groeisectoren. Investeren in onderzoek en innovatie (inclusief slimme implementatie) is dus niet zozeer een kostenpost, maar een investering met aanzienlijk rendement.

Op de volgende pagina's gaan we in op bovengenoemde aspecten en op de benodigde acties voor Nederland.

I. INNOVATIE MAAKT DE ENERGIE-TRANSITIE AANZIENLIJK GOEDKOPER

Uiteindelijk kunnen duurzame alternatieven – door te blijven innoveren – in veel gevallen goedkoper worden dan de huidige fossiele energie. De kosten van de opwekking van zonne- en windenergie zijn de afgelopen jaren spectaculair gedaald. De kosten per eenheid vermogen uit zonnepanelen zijn alleen al in de afgelopen ruim vijf jaar met een factor 4 gedaald, waardoor met grote projecten in het Midden-Oosten al kostenniveaus van minder dan 2,5 eurocent per kWh worden behaald¹. Dat is een halvering vergeleken met de kosten van gasgestookte centrales. Windenergie op de Noordzee heeft, wat betreft de productiekosten van de windparken, kostenpariteit bereikt met fossiel gestookte centrales. Die kostendalingen van zonne- en windenergie gaan komende jaren onverminderd door als er in innovatie geïnvesteerd blijft worden.² Niet alleen worden windturbines en zonnecellen steeds goedkoper, maar ook kan de capaciteitsfactor (de jaarlijkse geproduceerde hoeveelheid energie per zonnepaneel of windturbine) door allerlei innovaties nog flink omhoog. Dit betekent dat het voor investeerders steeds aantrekkelijker wordt om in zonne-energie of windparken te investeren in plaats van in kolen- of gascentrales. In West-Europa is op dit moment nagenoeg geen fossiel gestookte centrale meer gepland



GROTE PROJECTEN IN HET MIDDEN-OOSTEN HALEN AL KOSTENNIVEAUS VAN 2,5 EUROCENT PER KWH

en alle nieuwe capaciteit is gebaseerd op duurzame bronnen. Door de kostendaling van zonne- en windenergie vindt er dus een grote transformatie van de elektriciteitsvoorziening plaats.

Deze kostendalingen komen voort uit 'technologisch leren' dat bestaat uit twee componenten, ten eerste: grootschalige uitrol van zonne- en windparken waardoor productie en installatie goedkoper wordt, en ten tweede: innovatie dankzij consistent uitgevoerd fundamenteel en toegepast onderzoek.

TNO heeft berekend wat de invloed is van lagere kosten voor zonnepanelen en windparken op de totale investeringen die nodig zijn voor de energietransitie. We hebben in een integraal rekenmodel van de Nederlandse energiehuishouding voor 2050 twee situaties vergeleken. In de eerste hebben we de investeringskosten voor windparken en zonnepanelen laten dalen waarbij we een gemiddelde prijsdaling aannamen. Bij de andere veronderstelden we een sterkere prijsdaling door onder andere innovatie, zoals voorspeld in een aantal gezaghebbende studies³. Het resultaat is significant: in de situatie van een sterkere kostendaling van alleen al zonne- en windenergie vallen de totale investeringskosten voor de energietransitie meer dan 10% lager uit.

10% minder investeringskosten energietransitie door lagere kosten van zon en wind

Ook zijn de kosten van technologieën als batterijen voor auto's en LED-verlichting⁴ sterk gedaald. Die zullen blijven dalen als de innovatie doorgaat, waardoor deze duurzame producten voor vrijwel iedereen bereikbaar worden. Andere energietechnologieën bevinden zich in een eerder stadium van de leercurve en hebben nog veel potentie om in kosten te dalen. Denk bijvoorbeeld aan de kosten van de productie van nieuwe generatie duurzame biobrandstoffen die op middellange termijn kunnen concurreren met olieprijs van \$ 60 per vat⁵ of aan elektrolyse voor waterstofproductie die in combinatie met goedkope groene stroom kan concurreren met waterstofproductie uit aardgas⁶. Dan zijn er nog elektrische warmtepompen voor het verwarmen van huizen, waarbij niet alleen een lagere kostprijs belangrijk is maar ook comfort en gebruiksvriendelijkheid. Tenslotte zijn er nieuwe, elektrochemische processen in de industrie die inherent efficiënter zijn en daardoor goedkoper kunnen worden dan de huidige generatie fabrieken⁷.

Kostendalingen van zonne- en windenergie gaan komende jaren onverminderd door

Nederland laat de wereld al langer zien goed te zijn in innovatie op het gebied van energie. Die lijn moeten we versterkt voortzetten en koppelen aan gericht beleid om de kosten van de energietransitie terug te brengen.

De energietransitie is nog maar net begonnen. Er zal in de komende decennia nog veel

gebeuren dat we nu niet volledig kunnen voorzien. Het is dus cruciaal om de basis van het innovatieportfolio breed te houden en ruimte te bieden aan nieuwe ideeën die bijdragen aan de overgang naar een CO₂-vrije energievoorziening. We moeten aan veel verschillende alternatieven blijven werken, zodat ook deze in kosten dalen en beschikbaar zijn als we ze nodig hebben. Trajecten van het laboratorium naar de markt duren doorgaans tien tot vijftien jaar en moeten dus over langere tijd ondersteund worden. Veelbelovende opties die tot voor kort nog weinig werden overwogen in Nederland zijn geothermie voor warmtevoorziening van gebouwen en de industrie en productie van zeewier als bron van duurzame biomassa. Beide kunnen door verdere innovatie in de komende decennia een significante bijdrage leveren aan de Nederlandse energiemix⁸.

ACTIES:

- Blijf structureel investeren in onderzoek en innovatie daar waar de meeste winst te behalen valt in CO₂-reductie en kostendaling. Zorg voor doorgaande kostendaling door innovatie voor opties die al op de markt zijn, zoals zonne- en windenergie. Een stabiel onderzoeks- en innovatieklimaat en veel nadruk op internationale samenwerking (om kosten te delen) zijn daarbij cruciaal.
- Investeer in kennis die nodig is om de uitrol van nieuwe energietechnologie en -diensten soepel te laten verlopen en het draagvlak voor de energietransitie te vergroten.
- Hanteer een robuuste innovatie-aanpak door te werken aan veel en verschillende alternatieven, zodat ook die in kosten dalen.

II. DE ENERGIETRANSITIE WORDT GOEDKOPER DOOR GEDEGEN ANALYSES EN EEN SLIMME, INTEGRALE AANPAK

De energietransitie betekent een complexe systeemverandering. In het klimaatakkoord is sprake van honderden maatregelen, die allemaal met elkaar samenhangen en elkaar kunnen versterken of in de weg kunnen zitten. Met gedegen analyses en een integrale, lange termijn blik op het veranderende energiesysteem is de transitie veel beter te sturen. Dit helpt teleurstellingen en onrendabele investeringen te voorkomen en bespaart daarmee veel kosten in de realisatie.

Een van de uitdagingen in de energietransitie is bijvoorbeeld het garanderen van leveringszekerheid van elektriciteit. Terwijl het aanbod door zon en wind variabel wordt, neemt de vraag sterk toe door elektrisch vervoer, elektrificatie van de industrie en elektrische verwarming van gebouwen. Er is op dit gebied technologieontwikkeling nodig en ook onderzoek naar verdienmodellen en marktordening. Uit eigen onderzoek⁹ blijkt dat de kosten het laagst uitvallen als we optimaal gebruik maken van duurzame opwekking in de ons omringende landen en er veel regelbare vraag naar elektriciteit is georganiseerd. Een voorbeeld daarvan is de productie van waterstof met behulp van elektrolyse. Slim is ook het gebruiken van bestaande infrastructuur, zoals het gasnet voor het transport van waterstof.

Voor veel ontwikkelingen kan Nederland het best aansluiting zoeken bij initiatieven in Noordwest Europa. Dat betekent schaal-grootte, bespaart veel geld en versnelt de transitie. Voorbeelden zijn de elektriciteitsnetwerken op de Noordzee, waterstof-transportnetwerken en infrastructuur voor transport en opslag van CO₂. Nederland kan ongeveer 100 miljard euro besparen door coördinatie van de energietransitie in de Noordzeeregio met alle omringende landen.¹⁰ Realisatie van mogelijk meer dan 250 GW wind offshore, uitbreiding

van elektriciteitsnetten, gebruik van gasnetten voor waterstof, CO₂-opslag en zeewierproductie voor biobrandstoffen vergt een gezamenlijke aanpak. Verdere integratie van het energiesysteem in deze regio maakt het bovendien makkelijker vraag en aanbod te balanceren.

Aansluiting zoeken bij initiatieven in Noordwest Europa

Ook biomassa vraagt om optimale inzet. Het klimaatakkoord benadrukt dat duurzame biomassa niet onbeperkt beschikbaar is en dus met zorg moet worden ingezet. Tegelijk speelt biomassa een rol in de plannen voor sectoren zoals warmte en zwaar transport. En juist ook buiten de energiesector ontstaat er veel vraag naar biomassa, zoals in de chemische industrie. Bovendien zal de internationale lucht- en scheepvaart grote hoeveelheden duurzame koolstof nodig hebben (circa 700 PJ boven op de 3.000 PJ energiegebruik in Nederland¹¹), waarvoor biomassa een belangrijke optie is. Optimale inzet van biomassa vergt dus ook overzicht en coördinatie in de tijd.

De investeringscycli in de energiesector zijn lang, zeker in de elektriciteitsproductie, de energie-infrastructuur en de industrie. Keuzes die de komende jaren gemaakt worden om de doelen voor 2030 te halen, zullen dus ook sterk de mogelijkheden beïnvloeden om het hoofddoel (CO₂-vrij in 2050) te halen. Daarom moeten de op 2030 gerichte maatregelen steeds goed doorgelicht worden op de effecten in 2050. Dit moet voorkomen dat we in een lock-in terecht komen of onnodig hoge kosten

maken. Een voorbeeld is de aanleg van warmtenetten gevoed door restwarmte van de industrie of fossiele centrales. Als de industrie vervolgens overschakelt van met fossiele brandstoffen opgewekte hoge-temperatuurwarmte naar een elektrochemisch lage-temperatuurproces, kan die warmtebron zomaar wegvallen. Op langere termijn is het dan verstandig om iets meer te investeren in een warmtenet gevoed door duurzame aardwarmte of juist te investeren in het vergaand isoleren van woningen. Dan wordt de warmtevraag veel lager waardoor bijvoorbeeld alleen warmtepompen volstaan.


















Belangrijke voorbeelden waar slimme combinaties en planning zorgen voor rendabele en goedkopere uitkomsten dan de huidige energievoorziening zijn:

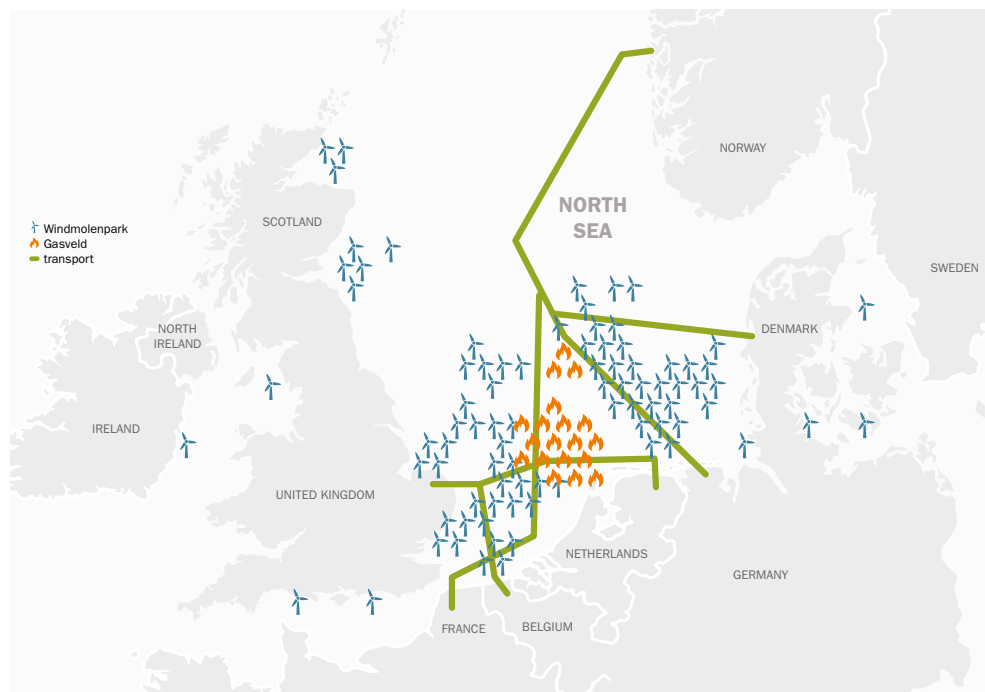
- Wijkgerichte aanpak van verduurzaming van de gebouwde omgeving. Passend bij woningtype, energievraag en wensen van de bewoners optimale pakketten ontwikkelen van besparing, isolatie, opwekking van

energie en warmtevoorziening die leiden tot kostenneutrale oplossingen voor huurders en woningeigenaren. De lagere energierekening compenseert de investeringskosten, terwijl het wooncomfort toeneemt¹².

- Er zijn aanzienlijke kostenvoordelen te behalen door toepassing van nieuwe industriële processen die klimaatneutraal en inherent goedkoper zijn. Hiervoor zijn slimme combinaties en integratie tussen fabrieken op industrieterreinen noodzakelijk. Hergebruik van grondstoffen, reststromen en warmte, bioraffinage en gezamenlijke CO₂- en waterstofinfrastructuur spelen een belangrijke rol. Zelfs negatieve CO₂-emissies zijn mogelijk door uit de lucht gehaalde CO₂ om te zetten in duurzame producten zoals bouwmaterialen of door toepassing van duurzame biomassa in combinatie met CO₂-afvang en -opslag.¹³ Voor toekomstige staalproductie wordt een dergelijk proces in Nederland al op kleinere schaal gedemonstreerd.

PAKKET

NET	TYPE	JAAR	BRON	OPSLAG	INSTALLATIE
					
					
					



DE NOORDZEE IN TRANSITIE NAAR DUURZAME ENERGIEREGIO

ACTIES:

- Bewaak de samenhang en stimuleer de samenwerking tussen de innovatieprogramma's. Binnen en tussen de verschillende sectoren zijn er veel ontwikkelingen die staan of vallen met ontwikkelingen elders. Er is dan wel een I (van integraal) voor KIA gezet, maar nog steeds dreigt versnippering: de IKIA is opgedeeld in 13 losstaande innovatieprogramma's.
- Stimuleer en onderhoud een integrale kennisinfrastructuur op energiegebied, waarin onderzoekers op verschillende gebieden van bedrijven, kennisinstellingen en universiteiten samenwerken. Er is

gedegen en structureel onderzoek nodig naar de genoemde afhankelijkheden, onzekerheden én synergiën in de energietransitie. Dergelijke analyses zijn nodig op Europese schaal, nationaal en ook op regionaal en lokaal niveau.

- Zorg dat de kennis over de energietransitie beschikbaar komt en gebruikt wordt door overheden, burgers en bedrijfsleven, zodat ze flexibel kunnen inspelen op nieuwe ontwikkelingen in de energietransitie. Help burgers en bedrijven duurzame beslissingen te nemen, want uiteindelijk zijn zij de belangrijkste beslissers in de energietransitie.

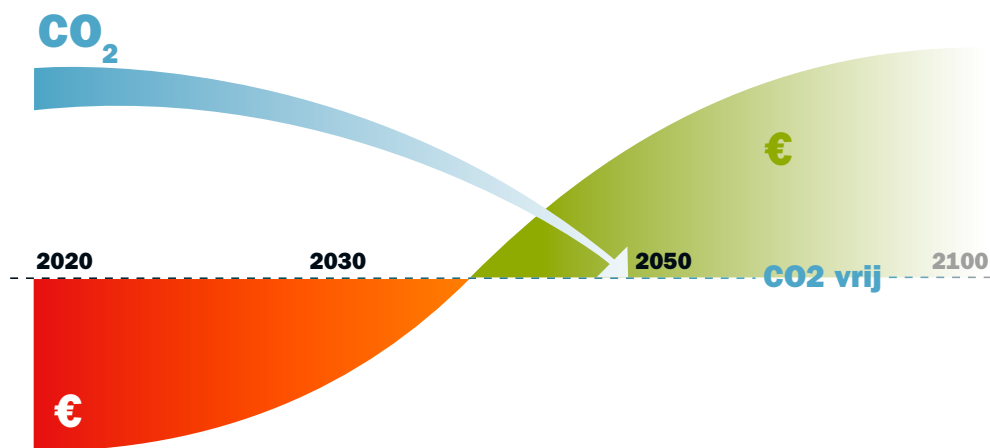
III. DE ENERGIETRANSITIE VERSTERKT DE NEDERLANDSE ECONOMIE

De energietransitie zal de economie van Nederland veranderen. Bepaalde bedrijfstakken, zoals de olie- en gassector en de kolenoverslag, zullen verdwijnen en veel andere zullen veranderen. Doordacht beleid kan er voor zorgen dat nieuwe bedrijvigheid de krimp meer dan compenseert. Op een aantal gebieden is Nederland goed gepositioneerd om te verdienen aan de energietransitie. Zo profiteert de Nederlandse offshore sector van de investeringen in windenergie en nieuwe infrastructuur in de Noordzee.¹⁴ In de sectoren bouw en installatietechniek wordt veel werk verwacht voor het verduurzamen van de gebouwde omgeving.¹⁵ Belangrijke potentiële groeisectoren in relatie tot de nieuwe energiesystemen zijn duurzame chemische industrie zoals biobased chemicaliën (benoemd in het SER advies over de kansen van de biobased economy in Nederland¹⁶), nieuw gas (waterstof, groen gas) en de ICT-sector. Ook de Noordzee biedt als hotspot van duurzame energieproductie Nederland straks grote kansen voor elektrificatie van de industrie en waterstofproductie. Recent eigen onderzoek geeft aan

dat de energietransitie zo'n 40 a 70 duizend nieuwe banen kan opleveren.¹⁷

De energietransitie zal de economie van Nederland veranderen

Veel van de energietechnologie die nodig is voor de transitie is nog niet massaal beschikbaar. Hier kan Nederland door slimme keuzes ook economisch profiteren, net als het gedaan heeft bij de opkomst van de fossiele energievoorziening. Voorop lopen stimuleert nieuwe bedrijvigheid, levert banen op en economische groei. Het rapport 'An energy transition risk test for the financial system of the Netherlands' van de Nederlandsche Bank uit 2018 wijst erop dat het bedrijfsleven zich voor toekomstige economische groei moet richten op nieuwe groeisectoren en exportmarkten en dat Nederland de nu juist groeiende afhankelijk-



heid van, steeds duurder wordende, import van fossiele brandstoffen aanzienlijk moet verlagen. We moeten nu voorsorteren op een nieuwe energievoorziening met ruime beschikbaarheid van groene energiedragers. Dit is doorslaggevend voor een concurrerende en duurzame industrie in de toekomst. De zware industrie die ooit leunde op ruime beschikbaarheid van goedkope fossiele energie, dreigt op termijn uit Nederland te verdwijnen. Die situatie kan worden omgedraaid als ons land de juiste condities biedt voor de klimaatneutrale industrie van de toekomst. Met ruim beschikbare groene energie, de benodigde energie-transportinfrastructuur, een CO₂-netwerk en duurzame biomassa-aanvoer is een nieuwe generatie industrie juist hier in staat broeikasgasneutraal te produceren terwijl elders steeds hogere prijzen voor CO₂-uitstoot en fossiele energie moeten worden betaald¹⁸.

Ten slotte zijn er gezaghebbende studies van het International Energy Agency¹⁹ en de Europese Commissie,²⁰ die aangeven dat een toekomstige energievoorziening gedomineerd door duurzame bronnen, gecombineerd met grote verbeteringen in energie efficiency in alle relevante sectoren uiteindelijk goedkoper uitvalt ten opzichte van een business as usual toekomst waarin we afhankelijk blijven van (steeds duurder wordende) fossiele brandstoffen.

ACTIES:

- Zet in Nederland vooral in op innovatie die naast emissiereductie ook exportkansen en nieuwe banen biedt.
- Richt het innovatiebeleid niet alleen op het verduurzamen van de huidige CO₂-uitstotende bedrijven, maar ook op het creëren van kansen voor nieuwe producten en diensten en voor toekomstige bedrijven die voor duurzame doorbraken kunnen zorgen.
- Zie de energietransitie en energie-innovatie niet als een kostenpost, maar als een investering in een sterke, toekomstbestendige economie. Bij het doorrekenen van de energietransitie dient naast een helder beeld van de integrale kosten veel meer nadruk te liggen op de baten van de energietransitie. Dat moet ook duidelijk maken op welke wijze de beste economische resultaten zijn te behalen.

IV. DE ENERGIETRANSITIE DRAAGT BIJ AAN EEN GEZONDER EN ECONOMISCH STABIELER NEDERLAND

Een goed doordachte en uitgevoerde energietransitie heeft veel positieve effecten op andere gebieden, zoals de luchtkwaliteit en hergebruik van grondstoffen. De transitie dringt emissies van NO_x , SO_2 en fijnstof in hoge mate terug als het wagenpark op elektriciteit of waterstof rijdt. Schone lucht draagt weer bij aan een gezonde bevolking en een hogere levensverwachting. Anderzijds kunnen ontwikkelingen in andere sectoren bijdragen aan de energietransitie, zoals meer circulair produceren en consumeren.

Dit betekent minder energiegebruik voor de productie van basismaterialen als staal, cement, plastics en aluminium en dus verlaging van CO_2 -emissies. Ook levert het een besparing op in het gebruik van ruwe grondstoffen die steeds schaarser en duurder worden en lagere kosten voor afvalverwerking.

Elektrisch rijden dringt emissies van NO_x , SO_2 en fijnstof in hoge mate terug

Stabiliteit en betrouwbaarheid zijn belangrijke pijlers van een duurzaam energiesysteem. Daarom is het van belang onze energievoorziening te diversifiëren en minder afhankelijk te zijn van import van energie uit geopolitiek onstabiele regio's. Daarnaast uit stabiliteit zich in evenwichtiger prijzen op de energiemarkten. De impact van pieken in de olieprijs op de economische groei (bijvoorbeeld van Europa) was in het verleden altijd zeer negatief.

ACTIES:

- Verbind de energietransitie en energie-innovatie met andere maatschappelijke doelen en combineer die met gerichte maatregelen: bijvoorbeeld én vergroten van bereikbaarheid én betere luchtkwaliteit én CO_2 -reductie.
- Zorg voor multidisciplinair onderzoek en een brede kennisbasis om de afhankelijkheden te onderzoeken en optimale synergie tussen verschillende milieu en andere doelen te bereiken.

CONCLUSIE

Nederland formuleert ambitieus beleid om de overgang naar een duurzame energievoorziening te versnellen. In het maatschappelijk debat gaat het vooral over de kosten.

Die kosten kunnen flink omlaag door slim te innoveren en de transitie doordacht aan te pakken. Bovendien leidt de energietransitie dan tot aanzienlijke baten, zowel in termen van nieuwe banen en export als in verhoogde gezondheid voor de burgers. Het klimaat-akkoord en de bijbehorende kennis- en innovatieagenda is een goede start. TNO draagt maximaal bij aan de IKIA met het ontwikkelen van nieuwe kennis en technologie die de energietransitie versnellen en goedkoper maken.

Deze paper is een oproep om de energietransitie goed te regisseren: er is meer samenhang tussen de maatregelen en meer slimme innovatie nodig om de kostenverlaging te realiseren en de baten werkelijkheid te laten worden. In 2019 doen we uitgebreid onderzoek naar de mogelijkheden voor kostenverlaging en maximalisering van de baten van de energietransitie. Daarnaast werken we samen met planbureaus en universiteiten aan een samenhangende set tools en rekenmodellen voor beleidsmakers en bedrijven om de energietransitie optimaal aan en bij te kunnen sturen. Ook helpen ze de impact op economie en milieu en de effectiviteit van maatregelen veel beter te begrijpen en te voorspellen.

REFERENTIES

1. De biedingen op tenders voor grootschalige zonne-energieprojecten dalen snel, in 2018 tot onder de 2,5 cent per kW. Zie bijvoorbeeld <https://www.pv-tech.org/editors-blog/bifacial-technology-was-likely-reason-worlds-lowest-ever-solar-bid-was-reje> voor een analyse hoe innovatieve bifacial zonnepanelen een rol spelen in de kostendaling. IRENA heeft onderzocht dat de kosten van zonne- en windenergie op korte termijn competitief worden met fossiele energie: *Renewable power generation costs in 2017*, IRENA, January 2018.
2. Zie het rapport 'Current and Future Cost of Photovoltaics' van Fraunhofer ISE en Agora Energiewende februari 2015.
3. De berekeningen zijn gedaan met het OPERA-model. https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Rekenmodellen_21_2b9d3fa8e4.pdf De kosten voor zonne-energie komen uit 'Current and Future Cost of Photovoltaics' van Fraunhofer ISE en Agora Energiewende en die voor windenergie van Danish Energy Agency, september 2018: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/havvindsnotat_translation_eng_final.pdf.
4. Lithium-ion batterijen kostten in 2016 vier keer minder dan in 2010. <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/07/BNEF-Lithium-ion-battery-costs-and-market.pdf> LED-lampen zijn volgens U.S. Energy Information Administration meer dan 5 keer zo goedkoop geworden tussen 2010 en 2015: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=18671>
5. Zie <http://www.biofuelsforeurope.eu/cost-competitiveness/>
6. Zie Detz et al., *Energy Environ. Sci.*, 2018, 11, 1653
7. Zie www.voltachem.nl.
8. Voor zeevier wordt door DNVGL voor 2035 een potentieel van 18 PJ geschat. Zie: https://www.fluxenergie.nl/wp-content/uploads/2017/04/DNVGL_Rapport_Biomassabeschikbaarheid-in-Nederland.pdf
9. Zie de resultaten van het Flexnet-project uit 2017. <https://www.tno.nl/nl/aandachtsgebieden/ecn-part-of-tno/roadmaps/naar-een-breed-gedragen-energietransitie/markten-elektriciteit-en-warmte-optimaal-organiseren/flexibility-of-the-power-system-in-the-netherlands-flexnet/>
10. Het potentieel van systemintegratie op de Noordzee wordt verder toegelicht in [https://www.north-sea-energy.eu/documents/North Sea Energy I Klimaatwinst door systeemintegratie op de Noordzee.pdf](https://www.north-sea-energy.eu/documents/North%20Sea%20Energy%20I%20Klimaatwinst%20door%20systeemintegratie%20op%20de%20Noordzee.pdf) van het North Sea Energy consortium.
11. Zie onder andere 'Aanzet tot een routekaart waterstof' van Marcel Weeda (ECN part of TNO) en Jörg Gigler (Topsector Energie) maart 2018.
12. Voor meer informatie zie de kennisagenda energie in de gebouwde omgeving van TNO. https://www.tno.nl/media/6782/kennisagenda_energie_in_de_gebouwde_omgeving.pdf
13. Zie Remko Detz en Bob van der Zwaan, *Transitioning Towards Negative CO2 Emissions*, Submitted bij Energy Policy.
14. De recente studie 'De economische bijdrage van windenergie op zee' van PWC, 2018 laat zien dat er nu al ca. 6000 fte Nederlandse werkgelegenheid is in de aanleg van windparken op de Noordzee. PWC verwacht een groei naar ca. 12.000 fte in 2030.
15. Zie bijvoorbeeld het advies van de SER 'Energietransitie en werkgelegenheid' uit juni 2018.
16. 'Meer chemie tussen groen en groei De kansen en dilemma's van een biobased economy', Sociaal-Economische Raad, december 2010
17. 'Verkenning werkgelegenheidseffecten van klimaatmaatregelen'. TNO 2019 P10369, Ton van Dril.
18. Zie de studie 'System approach for a sustainable industry - Understanding the need for systems analysis to support the energy transition of the industrial sector' van Andrea Ramirez, Kornelis Blok, André Faaij, Hans Meerman, Ernst Worrell, Gert Jan Kramer en Machteld van den Broek uit 2019
19. 'Perspectives for the energy transition - Investment Needs for a Low-Carbon Energy System' van IEA en IRENA, 2017.
20. 'A Clean Planet for all - A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy', European Commission, November 2018.

Contact

André Faaij

WETENSCHAPPELIJK DIRECTEUR ECN PART OF TNO

Ruud van den Brink

SENIOR ONDERZOEKER ECN PART OF TNO

✉ klimaataakkoord@tno.nl

☎ 088 866 24 11



TNO.NL