



UvA-DARE (Digital Academic Repository)

Energie en klimaatverandering

Uitdagingen en kansen in de 21e eeuw

van der Zwaan, B.

Publication date

2014

Document Version

Final published version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

van der Zwaan, B. (2014). *Energie en klimaatverandering: Uitdagingen en kansen in de 21e eeuw*. (Oratiereeks; No. 513). Vossiuspers UvA.

General rights

It is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), other than for strictly personal, individual use, unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Disclaimer/Complaints regulations

If you believe that digital publication of certain material infringes any of your rights or (privacy) interests, please let the Library know, stating your reasons. In case of a legitimate complaint, the Library will make the material inaccessible and/or remove it from the website. Please Ask the Library: <https://uba.uva.nl/en/contact>, or a letter to: Library of the University of Amsterdam, Secretariat, Singel 425, 1012 WP Amsterdam, The Netherlands. You will be contacted as soon as possible.

Energie en klimaatverandering

Energie en klimaatverandering

Uitdagingen en kansen in de 21e eeuw

Rede

uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van
bijzonder hoogleraar 'Sustainable Energy Technology'
aan de Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica
van de Universiteit van Amsterdam
op woensdag 3 september 2014

door

Bob van der Zwaan

Vossiuspers UvA is een imprint van Amsterdam University Press.
Deze uitgave is totstandgekomen onder auspiciën van de Universiteit van Amsterdam.

Dit is oratie 513, verschenen in de oratiereeks van de Universiteit van Amsterdam.

Omslag: Crasborn BNO, Valkenburg a/d Geul
Opmaak: JAPES, Amsterdam

© Bob van der Zwaan, Amsterdam 2014

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voorzover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16B Auteurswet 1912 j° het Besluit van 20 juni 1974, St.b. 351, zoals gewijzigd bij het Besluit van 23 augustus 1985, St.b. 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 882, 1180 AW Amstelveen). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) dient men zich tot de uitgever te wenden.

*Mevrouw de rector magnificus,
Mevrouw de decaan,
Hooggeachte leden van het curatorium van de leerstoel
“Sustainable Energy Technology”
Hooggeachte bestuursleden van Stichting Physica,
Zeer gewaardeerde collega’s van ECN en UvA,
Beste familie en vrienden, waarde toehoorders,*

I would like to start briefly addressing those of you in the audience who do not master the Dutch language. There is a tradition in this country, that inaugural lectures are held in the language of the Low Lands. While Dutch is no longer an absolute necessity, I have decided to stick to this tradition. I am hereby not facilitating my task, as I rarely lecture in my mother tongue, and much of the terminology used in the domain of my research I essentially only know in English. For several concepts I managed to find appropriate Dutch equivalents, while for others I failed to do so. To accommodate the Anglophones in the audience, however, I have assembled my accompanying material in English, so that you too can follow the essence of my story. To you I also confess that I am not accustomed to read aloud a lecture written on paper, and it is rare to have to satisfy an audience with both knowledgeable members from the public and expert colleagues who know the details of our subject matter. Enough apologies.

Ik zou willen beginnen met een persoonlijke noot, omdat ik, in zekere zin, voorbestemd was om geheel iets anders te gaan doen, zoals deze foto van opa en mijzelf aantoont. Opgroeiend in het Oosten van Brabant, m.n. De Peel, besefte ik als jongeling al gauw dat ‘boswachter’ een mildere versie inhield van een duidelijk harder boerenbestaan. Een zekere logica zat er in de geleidelijke ontwikkeling van mijn interesses, omdat mijn plannen zich vervolgens specificieerden om ooit biologie te gaan studeren, wat vervolgens scheikunde werd, en wat pas in de laatste fase van mijn eindexamenjaar resulteerde in mijn keuze voor natuurkunde. Na een promotie in de fysica onderzocht ik zaken die slechts deels iets met deze oorspronkelijke discipline te maken hadden. Dat ik vandaag, bij wijze van symbolische terugkeer, wegens de *Stichting Physica*, deze oratie mag geven is een bijzondere eer. Van de *hoge energie*



fysica ben ik jaren geleden beland in de *lage energie* analyse. Ik heb me sindsdien toegelegd op diverse velden van onderzoek, waaronder ook de economie en internationale betrekkingen. Voor mijn huidige werk blijkt dit nuttig, zelfs onmisbaar, want voor het begrijpen en oplossen van het mondiale energie- en klimaatprobleem is een multidisciplinaire benadering vereist.

We leven in deze jonge eeuw in een wereld met meer welvaart dan ooit tevoren, maar met tegelijkertijd veel grote uitdagingen. Het zijn ook interessante tijden, want we staan aan de vooravond van een noodzakelijke totale transformatie van de manier waarop we energie produceren en consumeren. Ons huidige energiesysteem is grotendeels gebaseerd op het verbranden van fossiele brandstoffen: kolen, olie en aardgas. Om duurzaamheidsproblemen waaronder klimaatverandering te beheersen zal dit systeem de komende decennia fundamenteel moeten veranderen. In deze oratie hoop ik uiteen te zetten op welke energietechnologieën de mensheid zoal in zou kunnen zetten, en welke andere daarentegen met grotere voorzichtigheid betracht moeten worden, hoe eerstgenoemde op grote schaal geïntroduceerd kunnen worden en welke obstakels daarbij overwonnen dienen te worden, en welke handicaps van laatstgenoemde beter beheerst moeten worden – hoe voor beide, tenslotte, meer onderzoek, naast fysieke implementatie, kan leiden tot schonere, efficiëntere, veiligere en meer betaalbare technieken.

Broeikasewfect

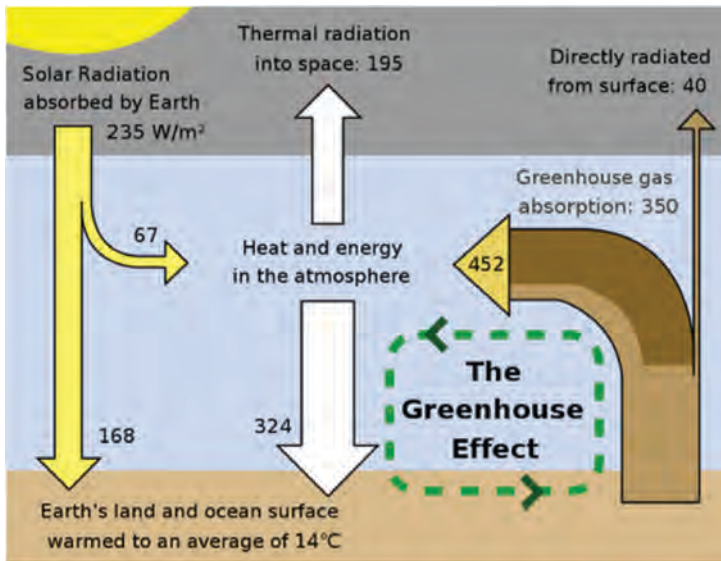
Publieke zorgen over de mogelijke effecten van klimaatverandering zijn relatief nieuw. Pas in de jaren '90 van de vorige eeuw begon deze problematiek bekendheid te genieten bij beleidsmakers, nadat die in toenemende mate bestudeerd was door klimaatwetenschappers in de decades daarvoor. Pas sinds het vorig decennium werd klimaatverandering een onderwerp dat bekend werd bij het brede publiek, wat tot uitdrukking kwam in het toekennen van de Nobelprijs voor de Vrede in 2007 aan Al Gore en de Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) voor hun werk op het gebied van het populariseren respectievelijk synthetiseren van kennis over klimaatverandering. Klimaatwetenschap bedrijven, daarentegen, is al een vrij oude academische tak van sport, zoals de tijdsbalk in Figuur 1 aangeeft. De Franse wiskundige Joseph Fourier suggereerde al in het begin van de 19e eeuw dat gassen in de atmosfeer van planeten de oppervlaktetemperatuur ervan kunnen verhogen (Fourier, 1824). De Schot John Tyndall bewees halverwege diezelfde eeuw dat de aardatmosfeer staat blootgesteld aan een "broeikasewfect", dat destijds alleen nog niet zo werd genoemd (Tyndall, 1861).

Figuur 1 Klimaatwetenschap is een relatief oude academische discipline



In retrospectief bleek 1896 een belangrijk jaar, omdat de Zweed Svante Arrhenius de relatie kwantificeerde tussen de concentratie van het broeikasgas kooldioxide in de atmosfeer en de gemiddelde temperatuur op Aarde (Arrhenius, 1896). Hij vond uit dat een verdubbeling van deze concentratie een tem-

Figuur 2 Het broeikaseffect: zonder dit effect zou de gemiddelde temperatuur op het Aardoppervlak ongeveer 33 °C lager zijn



Bron: Rohde, 2010

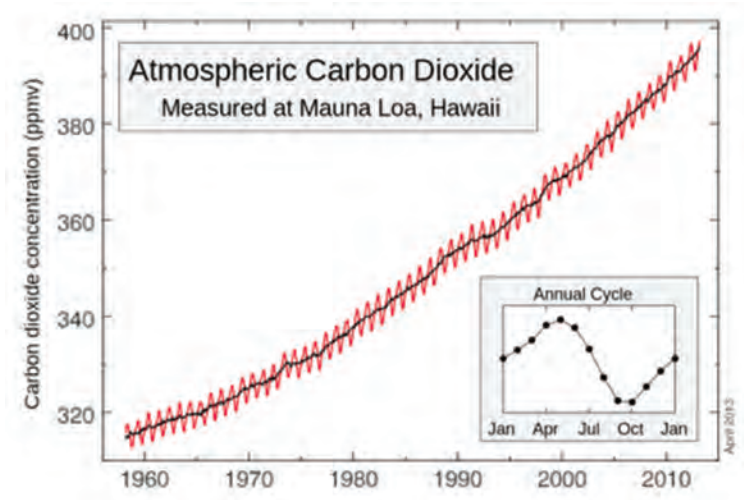
peratuursverhoging veroorzaakt van enkele °C, de klimaatsensitiviteit, een parameter die we vandaag nog steeds met ongeveer dezelfde onzekerheidsmarge hanteren. Het werk van de Serviër Milutin Milanković, die aantoonde dat de regelmaat in de opeenvolging van ijstijden synchroon liep met kleine variaties in de rotatiebewegingen van de Aarde, verzwakte lange tijd de aandacht voor het broeikaseffect (Milanković, 1941). Het op grote schaal verbranden van fossiele brandstoffen, waarbij kooldioxide vrijkomt, werd toen door de meeste wetenschappers niet als problematisch beschouwd. Na Milanković' dood in 1958 stapelde het bewijs voor de toename van het broeikaseffect door menselijke activiteiten zich op, waarmee het vandaag een ontegenzeggelijk fenomeen is.

In Figuur 2 ziet u het basismechanisme achter het broeikaseffect uitgelegd. Helemaal links staat met pijlen (in geel) aangegeven dat een deel van de straling van de Zon die de Aarde bereikt door de broeikasgassen in onze atmosfeer wordt opgenomen, maar dat het grootste deel door het aardoppervlak wordt geabsorbeerd. De grote pijl helemaal rechts (in bruin) geeft aan dat het overgrote deel van de warmte die het aardoppervlak afgeeft door de atmosfeer

wordt opgenomen. De pijlen in het midden (in wit) geven aan dat een meerderheid van de in de atmosfeer opgeslagen energie teruggestraald wordt naar het aardoppervlak, en het resterende deel de ruimte in. De aldus verkregen kringloop van energie (in groen) wordt het broeikaseffect genoemd. Zonder dit effect zou het op Aarde zo'n 33°C kouder zijn, en dus het leven zoals we dit nu kennen onmogelijk. Het leidt geen twijfel dat indien we meer broeikasgassen in de atmosfeer stoppen, het broeikaseffect zal toenemen. Het is dit *additionele* broeikaseffect dat in het centrum van onze belangstelling staat.

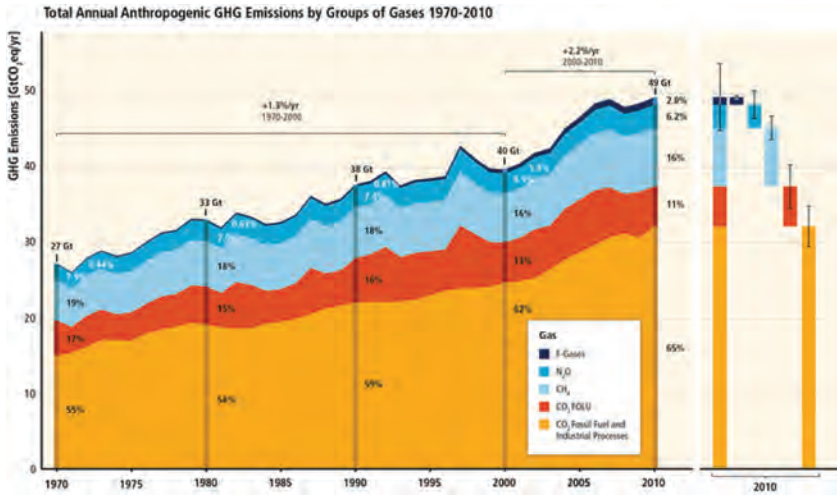
In Figuur 3, met de iconische curve van de Amerikaan Charles Keeling, ziet u de resultaten van metingen op Hawaii aan de atmosferische concentratie van kooldioxide sinds de jaren '50. In ruim een halve eeuw is deze toegenomen van minder dan 320 naar ongeveer 400 ppmv. De gemiddelde temperatuur op Aarde is sinds de Industriële Revolutie met bijna 1°C toegenomen. Overall in de wereld smelten gletsjers, het oppervlakte van Arctisch zee-ijs neemt af, en de zeespiegel stijgt. We hebben dus aan de ene kant een geaccepteerde broeikastheorie, gebaseerd op de welbekende eigenschappen van atmosferische gassen. Aan de andere kant observeren we hoe en begrijpen we waarom de concentratie van m.n. kooldioxide in de atmosfeer aan het toenemen is. Verder treden er mondiaal veranderingen op die aangeven dat het aardoppervlak aan het opwarmen is.

Figuur 3 Atmosferische concentratie van CO₂



Bron: Mauna Loa Observatory, 2013

Figuur 4 Jaarlijkse anthropogenische broeikasgasemissies (1970-2010)



Bron: IPCC AR5, SPM WG-III, 2014

Het plaatje is dus compleet. Wetenschappers concluderen unaniem dat het huidige toenemen van het niveau van anthropogenische broeikasgassen in de atmosfeer een verhoging van de temperatuur op Aarde genereert. Om een temperatuursverandering van enkele °C te voorkómen, moeten we de verhoging van m.n. de atmosferische kooldioxide concentratie een halt toe roepen. De crux daarvoor ligt in een minder kooldioxide uitstotend energiesysteem. Studies naar nieuwe materialen en *duurzame chemie* liggen aan de basis van een dergelijk gedecarboniseerd energiesysteem.

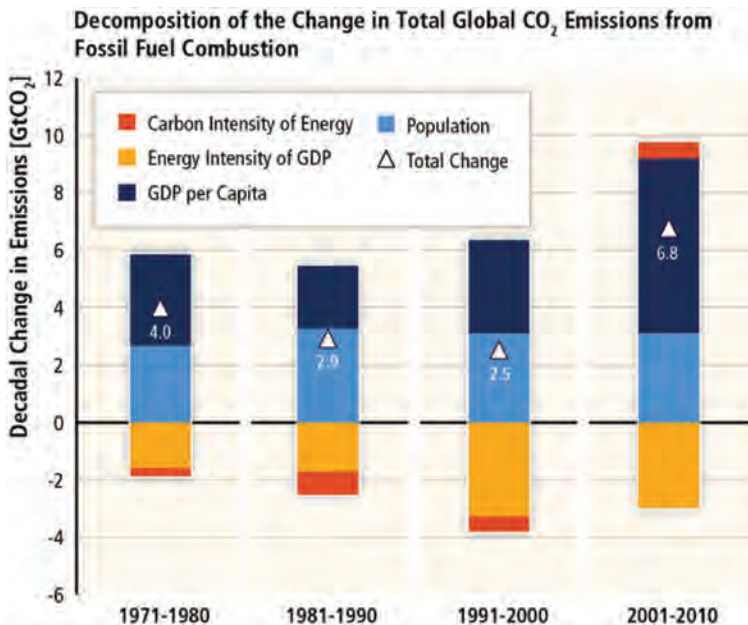
Kooldioxide

Helaas staat de werkelijkheid vooralnog orthogonaal op de noodzaak om kooldioxide emissies te verminderen. Zoals u in Figuur 4 ziet aan de getoonde oranje en rode vlakken zijn gedurende de afgelopen decennia emissies van kooldioxide sterk gestegen (IPCC, 2014). Deze Figuur toont trouwens dat de uitstoot van *alle* belangrijke broeikasgassen is toegenomen – naast kooldioxide ook methaan en lachgas. Recent kunnen we zelfs een versnelling waarnemen. Gedurende het eerste decennium van deze eeuw bedroeg de toename van broeikasgasemissies 2.2%/jaar, terwijl die gemiddeld slechts 1.3%/jaar be-

droeg gedurende de drie daaraan voorafgaande decennia. We doen dus precies het tegenovergestelde van wat we zouden moeten doen.

In Figuur 5 ziet u voor vier recente decennia de bijdragen aan de toename van kooldioxide emissies afkomstig van fossiele brandstoffen. Getoond zijn vier factoren, die samen de Kaya-identiteit vormen: bevolkingsgroei (in lichtblauw); groei van economische welvaart uitgedrukt in Bruto Nationaal Product (BNP) per hoofd van de bevolking, oftewel GDP per capita (in donkerblauw); de energie-intensiteit per eenheid van GDP (in oranje); en de kooldioxide-intensiteit per eenheid van energie (in rood). Met kleine driehoeken staat aangegeven wat de resultante is van deze factoren, die individueel niet altijd hetzelfde teken hebben. Deze driehoeken geven aan dat we in elk van de vier getoonde decennia substantiële stijgingen waarnemen van kooldioxide emissies. De toename bedraagt in de periode 2001-2010 zelfs 6.8 miljard ton kooldioxide, oftewel bijna 7 met 12 nullen kg.

Figuur 5 Broeikasgasemissies stijgen met een toename van BNP per capita en bevolkingsgroei. Recent is de decarbonisatie van energie gestopt



Bron: IPCC AR5, SPM WG-III, 2014

Deze Figuur geeft aan dat we vooruitgang boeken in termen van energie-intensiteit: per eenheid van GDP neemt de hoeveelheid energie in elk decennium aanzienlijk af. We zien dat er ook meestal enige winst wordt geboekt in termen van kooldioxide-intensiteit: per eenheid van energie maken we geleidelijk een kleinere kooldioxide voetafdruk. Maar we zien dat deze vooruitgang wordt overschaduwd door de tegenwerkende effecten van bevolkingsgroei en economische ontwikkeling, vandaar de netto emissietoename gedurende elk van deze decaden. Gedurende het afgelopen decennium zien we zelfs een *dramatische* toename, niet alleen en vooral verklaarbaar door een spectaculaire economische groei van sommige landen, maar ook door juist een *stijging* van de kooldioxide-intensiteit. Het rode vlakje is van beneden de x-as naar erboven gesprongen. De verklaring hiervoor is m.n. het grote aantal kolencentrales gebouwd in China vanaf 2001.

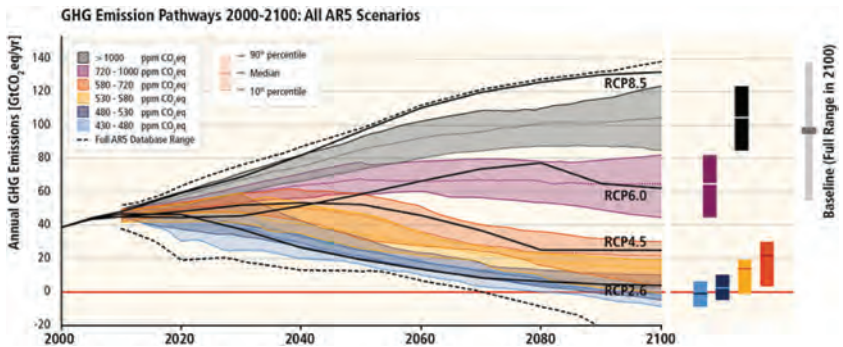
We moeten urgent met deze tendens breken. Laat het volgende een stelling zijn van deze oratie: “Als wij klimaatverandering niet corrigeren, dan zal klimaatverandering ons corrigeren”. Wat gebeurt er dan, indien we door blijven gaan met het emitteren van broeikasgassen op de manier zoals we nu doen? Precies weten we dat niet. Juist in deze onzekerheid sluipt het gevaar van ons huidig handelen: we zijn met een gigantisch experiment bezig met onze planeet waarvan we de gevolgen niet exact kennen. In grote lijnen kunnen we inmiddels de contouren van de uitkomst ervan schetsen, en de wetenschap blijft in ons begrip ervan vooruitgang boeken.

De grijze arcering in Figuur 6 laat zien dat we in een ‘business-as-usual’ scenario afstevenen op een bijna verviervoudiging van de concentratie van broeikasgassen gedurende slechts enkele eeuwen – dat is erg kort op geologische tijdschaal. De gemiddelde temperatuur op Aarde zal dan stijgen met 3,7 tot 4,8°C in de 21e eeuw. De onzekerheidsmarge van deze temperatuursverhoging wordt niet alleen verklaard door het onbekende pad van toekomstige broeikasgasemissies, maar ook door onze onvolledige kennis over de klimaat-sensitiviteit. Wellicht een koude winter vrezende, zult u niet zo’n probleem hebben met een dergelijke stijging van de temperatuur. In geo-historische termen is dit echter een groot temperatuursverschil: de gemiddelde divergentie tussen nu en de laatste ijstijd bedraagt zo’n 6°C, dus niet veel meer dan waar we nu over spreken.

Mogelijk nog belangrijker dan deze globale observatie is dat de *lokale* gevolgen van een dergelijke gemiddelde temperatuurtoename fenomenaal kunnen zijn. Zo kunnen sommige gebieden geteisterd worden door extreme droogte, andere door excessieve regenval en/of overstromingen, en weer andere door een grotere regelmaat van zware stormen. In sommige regio’s kan de temperatuurtoename dubbel zo hoog zijn dan het globale gemiddelde er-

van. Over de effecten hiervan op lokale ecosystemen, en hoe de Mens zich gaat aanpassen op veranderende weerspatronen, mogelijk door op grote schaal te migreren, weten we nog weinig. Het vermoeden tot dusver is dat de kosten van adaptatie aanzienlijk hoger zullen liggen dan de kosten van het voorkómen ervan (Stern, 2007). Meer onderzoek kan deze hypothese beter kwantificeren.

Figuur 6 Zonder extra klimaatmitigatie zal de gemiddelde mondiale temperatuur op Aarde stijgen met 3.7-4.8°C gedurende de 21e eeuw



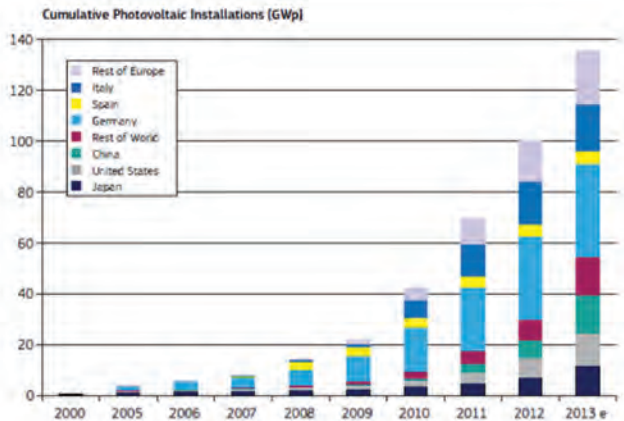
Bron: IPCC AR5, SPM WG-III, 2014

Klimaatmitigatie

In lichtblauw in Figuur 6 staat aangegeven hoe ver we broeikasgasemissies moeten reduceren om op een concentratie uit te komen die met redelijke zekerheid een maximale temperatuurstijging inhoudt van 2°C. De verzameling van handelingen benodigd om dit doel te bereiken wordt 'klimaatmitigatie' genoemd. De 2°C doelstelling is het niet te overstijgen niveau dat klimaatonderhandelaars internationaal hebben afgesproken, omdat we denken dat bij een dergelijke toename de schade nog enigszins beperkt kan blijven. Een belangrijk inzicht van deze Figuur is niet alleen dat vanaf nu broeikasgasemissies snel zullen moeten gaan afnemen om deze doelstelling te bereiken, maar ook dat tegen het einde van de eeuw deze emissies negatief zullen moeten zijn. Dus in plaats van broeikasgassen in de atmosfeer te emitteren, moeten we ze er dan uit gaan halen. Dit is een kolossale uitdaging, aangezien we momenteel elk jaar weer méér broeikasgassen uitstoten.

Zowel klimaat- als energiewetenschappen zitten vol onzekerheden en zaken die we nog moeten bestuderen. Maar: “The fact that we don’t know everything does not mean that we don’t know anything”. Dankzij bijna twee eeuwen onderzoek hebben we veel geleerd over hoe ons klimaat functioneert. Na jaren van uitgebreide analyses door klimaatonderzoekers is nu duidelijk, zoals bevestigd in het vijfde Assessment Report van de IPCC, dat de mens de zeer waarschijnlijke hoofdoorzaak vormt van de tot nu toe waargenomen opwarming op Aarde (IPCC, 2013). Tegelijkertijd hebben we veel uitgevonden over een groot scala aan diverse soorten energietechnologieën. Dat om ernstige klimaatverandering te voorkómen ons energiesysteem radicaal moet worden veranderd, en ook veranderd kán worden, leidt geen twijfel.

Figuur 7 Wereldwijde cumulatieve installaties van PV (in GW)



Bron: EC-JRC, PV Status Report 2013

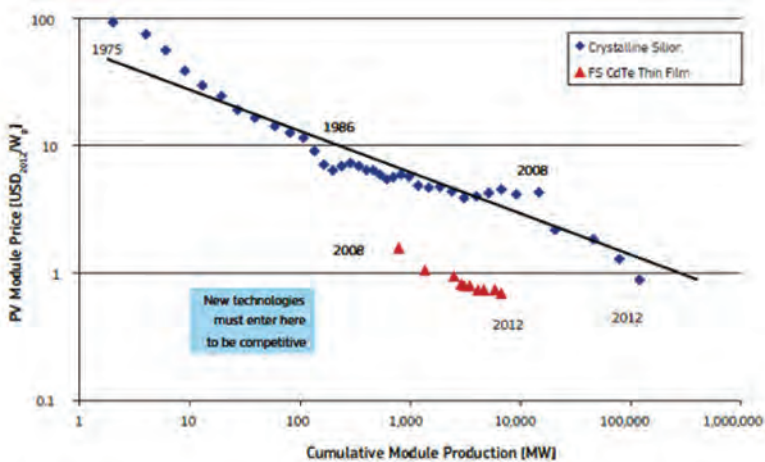
Hernieuwbare vormen van energie, zoals zonne-, wind- of biomassa-energie, lijken de meest geschikte opties voor klimaatmitigatie, omdat hun kooldioxide emissies vaak aanzienlijk lager liggen dan die van conventionele energieproductie. Hoe we het energiesysteem op de lange termijn precies moeten gaan veranderen weet nog niemand. We zullen, al proberend en corrigerend, lerenderwijs uit moeten vinden wat het optimale en best realiseerbare pad is. Paden zullen zonder twijfel sterk verschillen van land tot land. Ongetwijfeld zullen we véle technieken en energiebronnen tegelijkertijd moeten aanwenden, aan de ene kant omdat het klimaatprobleem zo groot is, aan de andere

kant omdat er geen “silver bullet”, geen “baguette magique”, bestaat voor de oplossing ervan. Hoe groot de door ons gegenereerde temperatuursverandering ooit kan worden weten we niet, net zomin als we de precieze schadekosten kennen als gevolg daarvan, uitgedrukt in monetaire eenheden. Maar juist vanwege deze onzekerheid moeten we nu beginnen met het lange en complexe proces van de transformatie van ons energiegebruik, als verzekering tegen mogelijk grote toekomstige schade. Omdat het probleem groot is, is de urgentie groot.

Zonne-energie

In veel opzichten lijkt zonne-energie de ideale oplossing als energiebron van de toekomst. Recente ontwikkelingen bevestigen dit. Zo heeft photo-voltaïsche elektriciteit, PV, een enorme groei doorgemaakt, zoals u kunt zien in Figuur 7. Deze Figuur laat zien dat sinds het jaar 2000 m.n. in Duitsland, Italië en Spanje, en buiten Europa in landen als China, Japan en de Verenigde Staten, de geïnstalleerde capaciteit van PV exponentieel is toegenomen. Deze Figuur toont ook dat de wereldwijd gebouwde PV capaciteit inmiddels beduidend meer dan 100 GW bedraagt. Ter vergelijking: 1 GW is de typische capaciteit van een kolencentrale.

Figuur 8 Leercurve voor PV



Bron: EC-JRC, PV Status Report 2013

Mede dankzij deze groei zijn de kosten van PV fenomenaal gereduceerd, o.a. door leerprocessen, zoals u in Figuur 8 kunt zien. Dit geldt ook *vice versa*: mede dankzij getoonde kostenreducties heeft de groei van PV zo'n grote vaart kunnen nemen, geholpen tot nu toe door substantiële subsidies. Deze leercurve voor PV vormt een unicum: voor geen enkele andere energietechniek is de vooruitgang tot nu toe zo groot gebleken, met een kostenreductie van twee ordes van grootte, van zo'n 100 € naar ongeveer 1 € per W. Er blijkt een wetmatigheid te bestaan in dit succes, dat ook bij andere energietechnologieën waargenomen wordt: bij elke verdubbeling van de geproduceerde capaciteit blijken de kosten met ongeveer 20% naar beneden te gaan. Als dit leerproces doorgaat, zal het geleidelijk op steeds meer locaties lonend worden om met PV elektriciteit te produceren.

Voor grootschalig gebruik van zonne-energie moet nog veel gebeuren. De kosten van PV zullen verder naar beneden moeten, zodanig dat een competitief *break-even* wordt bereikt met conventionele manieren van elektriciteitopwekking. We dienen beter te begrijpen hoe deze kostenreducties te realiseren, en moeten daarvoor de mechanismes analyseren achter getoonde leercurve. Al experimenterend kunnen we bepalen welke soort zonne-energie uiteindelijk het meest geschikt zal zijn voor grootschalige toepassing: het omzetten van zonne-energie in elektriciteit of (mogelijk eerst) in thermische energie, of wellicht het transformeren ervan in een zonne-brandstof. Geconcentreerde zonne-elektriciteit, CSP, verdient in deze context aandacht. We moeten te weten komen welke zonne-energie opties we waar het best kunnen gebruiken. Alleen voor PV al bestaan vele soorten, met verschillende efficiënties en kosten: we moeten bestuderen welk type uiteindelijk het best kan concurreren.

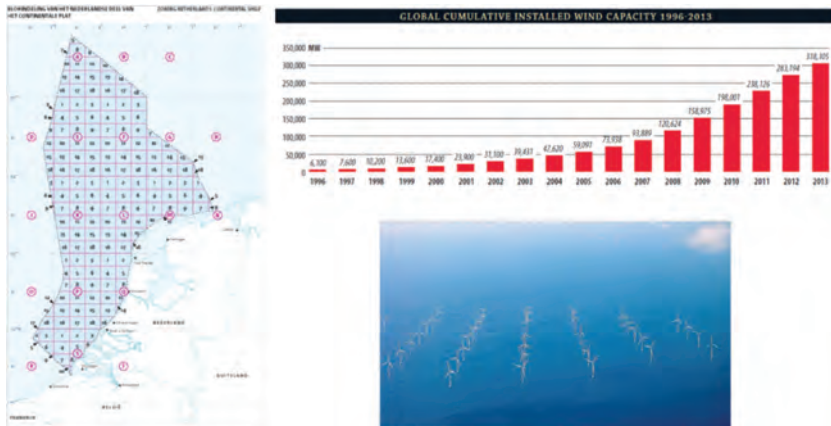
Nu kostencompetitiviteit voor PV steeds meer in het bereik ligt, biedt zich een nieuwe set van vragen aan: hoe gaan we zonne-energie integreren in ons huidige energiesysteem (Sinke, 2014). De zon is een 'intermittente' oftewel variabele energiebron: de zon schijnt niet altijd. Zonne-energie heeft een relatief lage energiedichtheid, d.w.z. veel meer oppervlakte is nodig voor bijv. PV dan voor het genereren van conventionele elektriciteit, typisch met een verschil van 3 ordes van grootte. Als we willen dat zonne-energie een significante rol speelt in onze energieproductie, dan zal het overal zichtbaar worden, in grote delen van onze steden en platteland (MacKay, 2009).

Windenergie

Een andere belangrijke kandidaat voor het decarboniseren van ons energiesysteem is windenergie. Net als zonne-energie, heeft windenergie een expo-

nentiële groei doorgemaakt, zoals u rechtsboven in Figuur 9 kunt zien. Mogelijk is volgend jaar mondiaal net zo veel windenergie als kernenergie capaciteit beschikbaar, zo'n 375 GW. Windenergie vereist voornamelijk in de meeste gevallen subsidies om te kunnen concurreren met klassieke elektriciteitscentrales, maar de te overwinnen kostenmarge is kleiner dan bij zonne-energie. Windmolens zijn op land op de meest optimale locaties, en met de meest geavanceerde turbines, al min of meer rendabel. Voor on-shore windenergie kunnen we dus bijna van winstgevendheid spreken. Niemand kan ver in de toekomst kijken, maar we weten dat d.m.v. technologische vooruitgang, en industriële leerprocessen en economische schaalvoordelen, verdere kostenreductie realiseerbaar is. Deze kostenafname is waarschijnlijk groter dan de eventuele kostentoeename t.g.v. bijv. materiaalschaarste. Windenergie zal dus ook in minder ideale situaties mogelijk in de nabije toekomst al concurrerend worden.

Figuur 9 Windenergie groei en mogelijkheden in Nederland



Bron: GWEC, 2013

Windenergie lijkt vooral in Nederland geschikt, aangezien ons land uitzonderlijk goede windpotentiëlen bezit. Nederland is echter een dichtbevolkte natie: de op land nog te benutten plekken, alhoewel uitbreidbaar, zijn onvoldoende om een aanzienlijk deel van onze elektriciteit d.m.v. windenergie te voorzien. We zullen dus off-shore moeten gaan, en op grote schaal windparken bouwen op de Noordzee, in de wateren van onze Exclusieve Economische Zone. Deze zone, links getoond, is groot: met 57.000 km² ongeveer anderhalf

keer zo groot als Nederland. Met enkele tientallen procenten van dit oppervlak gereserveerd voor het produceren van windenergie is het mogelijk om onze bevolking te voorzien in het grootste deel van haar energiebehoefte, op een schaal waarmee wij op dit moment olie en gas consumeren (Thomas, 2014).

Off-shore windenergie is aanzienlijk duurder dan on-shore, ondanks dat hogere windsnelheden op zee, met dezelfde windmolens, meer elektriciteit genereren. De redenen hiervoor zijn de hogere kosten voor installatie en onderhoud – per boot, zoals u op de volgende foto kunt zien. Ook voor off-shore windenergie zullen de kosten zakken, door leereffecten, schaalvoordelen en het slim plannen van de benodigde basis-infrastructuur. Als we bovendien aan het uitstoten van broeikasgassen een prijskaartje hangen, dan valt de balans duidelijk uit naar de winstgevendheid van windenergie, op land én zee. Om dit prijskaartje voor windparkprojecten financieel voelbaar te laten worden, is het essentieel dat klimaatonderhandelingen in 2015 in Parijs tot een mondiaal klimaatakkoord leiden. Met een dergelijk prijskaartje kunnen de externe kosten van fossiele brandstoffen geïnternaliseerd worden.



De investeringskosten voor een off-shore windmolenpark dat groot genoeg is om een dominante rol te spelen in de Nederlandse energievoorziening zullen

groot zijn. Denk aan een “Deltaplan” voor onze energiesector, met kosten mogelijk een orde van grootte hoger dan die zijn gemaakt voor het wereldberoemde project dat vanaf de jaren '50 van de vorige eeuw is verwezenlijkt voor de bescherming van de Lage Landen tegen combinaties van hoogtij en stormvloed. Ik denk dat de baten van een dergelijk plan significant uitstijgen boven de kosten ervan, ook omdat Nederland zich moet voorbereiden op het uitgeput raken van onze gasvoorraden, waarschijnlijk over ongeveer twintig jaar.

Als wij willen voorkómen dat we afhankelijk worden van aardgas uit bijv. Rusland en het Midden Oosten, dan dienen we een domestiek substituuat te ontwikkelen. Gegeven de productie van schaliegas ongewenste milieueffecten met zich mee kan brengen, biedt windenergie een beschikbaar duurzaam alternatief om onze energievoorzieningszekerheid te waarborgen. In het in 2013 gesloten Nederlandse Energieakkoord wordt een weliswaar kleine maar belangrijke eerste stap gezet in de richting van grootschalig gebruik van onze nationale windvoorraden. Handicaps zoals de variabiliteit van windenergie kan men verminderen door de regionalisatie van elektriciteitsnetwerken, en kan men compenseren door slimme netwerken of d.m.v. opslagtechnieken, waaronder *power-to-gas* opties.

Biomassa

Biomassa en biobrandstoffen, getoond in Figuur 10, zijn net als aanpassing van landgebruik belangrijke opties voor klimaatmitigatie, zoals m.n. energie- en klimaatscenario's voor Latijns Amerika demonstreren. Op dat continent ligt bij biomassa een groot potentieel voor het reduceren van kooldioxide. Hoe en welke opties te gebruiken, binnen deze zeer grote categorie aan mogelijkheden, zijn nog veelal onbeantwoorde vragen. Er bestaan typen en productiewijzen van biobrandstoffen die slechts weinig minder emitteren dan fossiele alternatieven, of zelfs bijna net zoveel energie vergen als ze uiteindelijk aan energie opleveren. Biobrandstoffen die dit soort problemen oplossen zijn zeker niet ondenkbaar, zoals het huidige grootschalige gebruik van ethanol geproduceerd uit suikerriet in Brazilië aantoont, of zoals het mogelijk benutten van zeewier of biomassa-afvalstromen aangeeft. Maar verdere ontwikkeling van dit soort brandstoffen is onontbeerlijk.

Andere uitdagingen zijn de negatieve effecten die het op grote schaal verbouwen van gewassen voor de productie van biobrandstoffen kan hebben op voedselprijzen. Dit kan m.n. in ontwikkelingslanden tot grote problemen leiden, vooral voor de één miljard mensen in de wereld die leven op minder dan

1 € per dag. Het kappen van oerwoud of bos om de verkregen grond te gebruiken voor brandstofproductie kan ook dramatische gevolgen hebben voor de lokale biodiversiteit. Ontbossing in het algemeen vernietigt grote reservoirs van kooldioxide. Het is dus belangrijk om ontbossing zo veel mogelijk tegen te gaan en in plaats daarvan her(be)bossing of bebossing te stimuleren. Dit geldt niet alleen voor Latijns Amerika, maar ook elders, waaronder Europa. Biomassa is hernieuwbaar, maar de belangrijke vraag doet zich voor of het gebruik ervan voor energiedoeleinden ook duurzaam is.

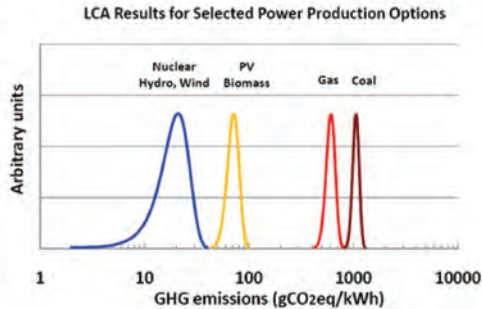
Figuur 10 Biomassa en biobrandstoffen



Kernenergie

Kerncentrales stoten ongeveer 100 keer minder kooldioxide uit dan kolencentrales per eenheid van geproduceerde elektriciteit, zoals de – overigens dynamische – Figuur 11 rechts laat zien. Omdat kernenergie momenteel ongeveer 12% bijdraagt aan de mondiale elektriciteitsproductie, speelt deze energiebron een belangrijke rol in het vermijden van broeikasgasemissies. Vanuit technisch oogpunt kan deze rol uitgebreid worden, zoals we zien in de voornemens van landen in het Midden en Verre Oosten om op grote schaal kerncentrales te bouwen. Kernenergie zou dus in principe tot één van de klimaatmitigatie alternatieven kunnen blijven behoren. Het wordt echter ernstig

Figuur 11 Broeikasgasemissies van kernenergie



Bron: van der Zwaan, 2013

belemmerd door een aantal substantiële tekortkomingen, als gevolg waarvan deze optie controversieel is onder brede lagen van de bevolking.

Kernenergie produceert sterk radioactief afval, dat zeer schadelijk is voor de gezondheid en een levensduur heeft van vele duizenden jaren. De kernramp in Chernobyl riep in 1986 een halt toe aan een forse uitbreiding van het gebruik van kernenergie in diverse landen, waaronder Nederland. Vijfentwintig jaar later leidde de kernramp in Fukushima tot de beslissing door meerdere regeringen, zoals van Duitsland, om kernenergie geheel uit te faseren. De risico's verbonden aan kernafval en reactorongelukken zijn te reduceren – ze moeten daarom 'progressief' beschouwd worden. Het is echter een illusie dat deze problemen ooit geheel uit te bannen vallen. Daarom dient de voorlopig positieve rol van kernenergie bij het oplossen van het klimaatprobleem afgewogen te worden tegen de tekortkomingen van deze optie, inclusief die op het economische en sociale vlak.

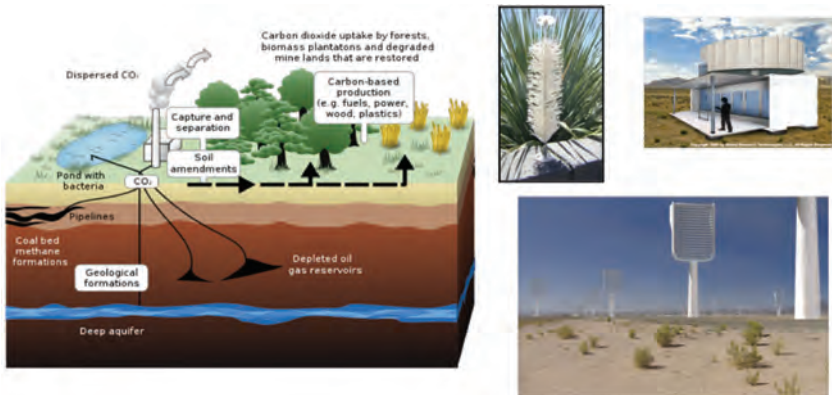
Aan het gebruik van kernenergie voor civiele doeleinden kleeft intrinsiek het gevaar dat nucleaire technologieën of materialen worden aangewend voor militaire of terroristische doeleinden. De *Pugwash Conferences on Science and World Affairs*, opgericht in 1957 naar aanleiding van het Russell-Einstein Manifesto, en samen met Joseph Rotblat in 1995 gelauwerd met de Nobelprijs voor de Vrede, stelt zich ten doel om proliferatie van nucleaire technologie voor onwenselijke doelen te voorkómen en algehele nucleaire ontwapening te bewerkstelligen. De mix van wetenschappelijke en internationaal-politieke activiteiten van *Pugwash* kunnen bijdragen aan soms ijdel uitzienende pogingen deze doelen uiteindelijk te bereiken. Deze organisatie lijkt me goed geplaatst om de

vraag te beantwoorden of, en zo ja wanneer, kernenergie mondiaal gezien uit het portfolio van klimaat-vriendelijke energieopties gehaald kan worden.

CCS

Het afvangen van kooldioxide en het opslaan ervan ondergronds, oftewel *carbon dioxide capture and storage* (CCS), zoals getoond in de linkerhelft van Figuur 12, lijkt in verschillende opzichten veelbelovend, maar is helaas ook controversieel (IPCC, 2005). Bij grote puntbronnen zoals in de elektriciteitssector en industrie kan CCS, technisch gezien, het leeuwendeel van kooldioxide emissies voorkómen. Primair obstakel bij de implementatie van CCS is economisch van aard: indien kooldioxide uitstoten gratis is, bestaat er weinig prikkel om emissies af te vangen. Emitteren moet kostbaar worden, met een prijs van minimaal enkele tientallen € per ton kooldioxide. Een dergelijke prijs moet stabiel hoog genoeg blijven, om de introductie van CCS door de private sector te realiseren. Het emissie handelssysteem in Europa, ETS, is hier in principe een adequaat instrument voor, alhoewel minder transparant dan een *carbon tax*. In zijn huidige vorm is het ETS echter onvoldoende. Het dient verder ontwikkeld, gecomplementeerd en aangescherpt te worden, m.n. om het doel van de Europese Commissie te bereiken om in 2030, t.o.v. 1990, een 40% reductie van broeikasgasemissies te verwezenlijken (EC, 2014).

Figuur 12 Afvangen en opslag van kooldioxide (CCS) en ‘air capture’



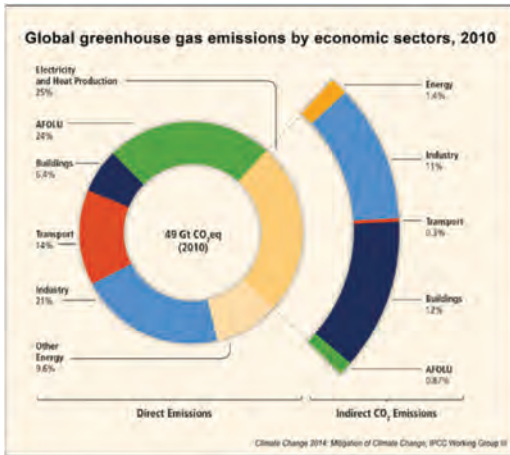
Bronnen: IPCC, 2005; Lackner *et al.*, 2012

Het kostenplaatje vormt niet de enige uitdaging van CCS. In Nederland is de implementatie ervan problematisch gebleken t.g.v. een negatieve publieke opinie, die zich richt op de mogelijke risico's gerelateerd aan het ondergronds opslaan van kooldioxide. Aardgas is miljoenen jaren opgeslagen geweest in diep gelegen geologische formaties, wat doet vermoeden dat veilige opslag van kooldioxide óók mogelijk is. Maar zekerheid hierover hebben we niet. Het zou kunnen dat in sommige gevallen kooldioxide langzaam omhoog lekt en uiteindelijk in de atmosfeer terecht komt. Niet uit te sluiten valt dat ondergronds injecteren van kooldioxide seismische trillingen induceert, of andere onwenselijke milieu-effecten genereert, zoals verzuring van zoetwaterbronnen. Geologische opslag van kooldioxide dient dus verder onderzocht te worden, terwijl sommige vragen beantwoord kunnen worden d.m.v. demonstratieprojecten.

Het aanplanten van bossen vormt een mogelijkheid om, d.m.v. fotosynthese, kooldioxide uit de atmosfeer te vangen. Er bestaan ook kunstmatige alternatieven voor het fixeren van kooldioxide. De rechterhelft van deze Figuur geeft één voorbeeld van een dergelijk 'air capture' instrument, een soort van flessenborstel. Ook ziet u twee tekeningen van hoe 'air capture' er ooit uit zou kunnen zien. De kooldioxide concentratie in de atmosfeer is zo'n 300 maal lager dan die in de uitlaatgassen van grote installaties, zodat air capture aanzienlijk duurder zal zijn dan reguliere CCS. Maar het principe ervan is aangetoond. Wellicht wordt het gebruik ervan eens noodzakelijk. Eén van de voordelen zou zijn dat het afvangproces kan plaatsvinden op de locatie van opslag, zodat kooldioxide niet over lange afstanden vervoerd hoeft te worden. Ook kan met air capture in principe alle kooldioxide afgevangen worden, d.w.z. onafhankelijk van waar die vandaan komt, dus inclusief uit kleine bronnen zoals van auto's, boten en vliegtuigen.

Fundamenteel onderzoek naar air capture, bijvoorbeeld m.b.t. de eigenschappen van kooldioxide bindende materialen, zou mijns inziens uitgebreid moeten worden. Zie air capture als een illustratie van het brede spectrum klimaatmitigatie opties die momenteel bijna ondenkbaar zijn, maar die door onderzoek wellicht gerealiseerd kunnen worden. Voor air capture kan een combinatie van fundamenteel onderzoek en kleinschalige demonstratie uitwijzen of voldoende lage kosten ooit bereikbaar zijn. Tegen critici die beweren dat, gegeven wat we nu weten over een enkele techniek, air capture nooit haalbaar zal zijn, zou ik willen zeggen: "op basis van het bestuderen van pinguïns dient men niet tot de conclusie te komen dat vogels niet kunnen vliegen" (Lackner, 2012).

Figuur 13 Broeikasgasemissies van de transport sector en elektrische auto



Bron: IPCC AR5, SPM WG-III, 2014

Transport

Zoals Figuur 13 laat zien is de transportsector, in rood aangegeven, na de elektriciteitssector, landgebruik, en industrie, verantwoordelijk voor het grootste deel van mondiale broeikasgasemissies. Het modifieren van onze vormen van transport is dus van fundamenteel belang. We staan aan het begin van een transformatie van deze sector: van huidige verbrandingsmotoren, via hybride voertuigen, naar wat lijkt te worden de elektrische en/of op biobrandstof rijdende auto. Enkele jaren terug werd uitgebreid gediscussieerd over de vraag of *waterstof* spoedig als mogelijke brandstof zou kunnen fungeren. Vandaag lijkt deze vraag voor de korte termijn beslecht in het voordeel van de elektrische auto. Voertuigen met brandstofcellen, die waterstof omzetten in elektriciteit, weten vooralsnog niet snel een marktaandeel voor zich te winnen.

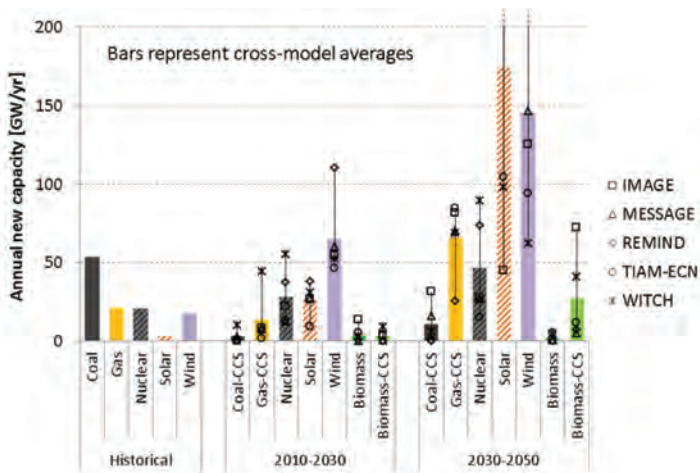
Op de lange termijn lijkt het simultaan bestaan van verschillende opties realistisch. De transportsector zal mogelijk meerdere transformaties doormaken, bijv. van de elektrische naar de waterstof-auto. Dit soort veranderingsprocessen, enkele jaren geleden nog vrijwel ondenkbaar, kunnen opeens snel verlopen. Zo lijdt de Chinese hoofdstad Beijing in hoge mate aan luchtvervuiling, waardoor lokale autoriteiten drastische maatregelen nemen om gezondheidsproblemen af te wenden. In deze stad rijden inmiddels vnl. elektrische

tweewielers, met als uitzondering fietsen. Ik heb lang geprapt tegen vrienden – die me voor gek verklaarden dat ik, tot op de dag van vandaag, nog steeds nooit een auto in mijn bezit heb gehad – dat ik wachtte op de emissie-vrije automobiel. Die grap begint steeds meer waarheid te worden. Wie weet dat tegen de tijd dat ik een auto nodig heb, mijn eerste voertuig op vier wielen inderdaad er één zal zijn zonder (althans directe) emissies van kooldioxide.

Co-benefits

Figuur 14 toont de mondiale capaciteit per jaar, gedurende de komende decennia, voor een aantal belangrijke klimaatmitigatie opties in de elektriciteitssector, nodig om *on track* te blijven van de 2°C doelstelling. Vooral vanaf 2030 is die capaciteit voor technologieën zoals zonne- en windenergie aanzienlijk groter dan we in ons recente verleden aan conventionele capaciteit hebben geïnstalleerd. De hier getoonde aantallen zijn echter niet alleen noodzakelijk voor het afwenden van oncontroleerbare klimaat-uitdagingen. Het voorkómen van grote klimaateffecten, d.m.v. deze mitigatie-opties, kan belangrijke “*co-benefits*” voortbrengen, oftewel collateralere voordelen die bovenop die van klimaatmanagement komen.

Figuur 14 Jaarlijks benodigde te installeren capaciteit, volgens vijf modellen (gemiddelden in kleur), in een scenario dat de 2°C doelstelling haalt



Bron: van der Zwaan *et al.*, 2013

Elk jaar sterven wereldwijd enkele miljoenen mensen aan de directe gevolgen van luchtvervuiling in grote steden, vooral t.g.v. het inademen van fijn-stof, oftewel kleine deeltjes die in de lucht rondzweven. Deze worden geproduceerd door het verbranden van benzine en diesel in de motoren van onze huidige voertuigen, en van kolen in elektriciteitscentrales. Een overgang van deze fossiele energiebronnen naar innovatieve op duurzame energie gebaseerde brandstoffen voor het beteugelen van lange-termijn klimaatverandering heeft als additioneel korte-termijn voordeel dat grootschalige mortaliteit en morbiditeit vermeden wordt.

Twee andere co-benefits zijn het creëren van werkgelegenheid, respectievelijk het reduceren van watergebruik. Het leidt geen twijfel dat het op grote schaal inzetten van hernieuwbare energietechnologieën veel nieuwe banen genereert. Maar of we *netto* werkgelegenheid creëren, d.w.z. meetellen dat we ook banen verliezen door het uifaseren van traditionele energiebronnen, is nog onduidelijk. Tot dusver onbeantwoorde vragen gerelateerd aan het werkgelegenheidspotentieel van duurzame energie behoeven verdere analyse.

Mogelijk wordt water in de toekomst in toenemende mate een schaarse natuurlijke hulpbron, zoals het nu al is in bijv. sommige delen van Afrika en het Midden Oosten. Het vervangen van huidige elektriciteitscentrales en de daarin gebruikte koeltechnieken door moderne alternatieven, zoals gebaseerd op hernieuwbare energie, kan leiden tot reducties in het gebruik van water, indien de juiste keuze voor innovatieve energie- en koeltechnieken wordt gemaakt. Hoe de balans te slaan of synergiën te creëren tussen een reductie van broeikasgasemissies en die van waterconsumptie, en welke *trade-offs* te maken tussen de kosten van klimaatmitigatie versus watergebruik, is een nog merendeels on-geëxploreerd gebied van analyse, aangeduid met de term *energy-water nexus*.

Ontwikkelingslanden

Expliciet heb ik nog weinig gezegd over ontwikkelingslanden. Gezien ongeveer 3 miljard mensen geen toegang hebben tot moderne vormen van energie, zoals elektriciteit, mag dit belangrijke onderwerp niet onbenoemd blijven (UN, 2012; GEA, 2012). Op de volgende satellietopname bij nacht van Europa en Afrika ziet u het schrille contrast in lichtgebruik tussen deze twee continenten. Elektriciteit vormt niet alleen de basis voor goede verlichting, maar ook voor moderne communicatie- en informatiemiddelen, en indirect voor onderwijs en economische ontwikkeling. De eerste prioriteit voor ontwikkelingslanden dient te zijn het creëren van universele toegang tot elektriciteit.



Nauw verbonden daaraan is het stimuleren van economische groei, het creëren van lokale investeringskansen, en het benutten van nationale potentiën en natuurlijke hulpbronnen.

Vice versa van wat ik eerder beweerde, moeten voor *déze* landen het verminderen van luchtvervuiling, creëren van werkgelegenheid, en conserveren van schaars water, als primaire thema's beschouwd worden, en niet slechts als co-benefits. Het verminderen van kooldioxide emissies is hier juist de co-benefit van deze cruciale thema's. In Afrika moge weliswaar klimaat-vriendelijkheid vooralsnog van ondergeschikt belang zijn, ook daar moeten bij het vormgeven van betrouwbare energiesystemen opties gekozen worden die niet alleen aan zoveel mogelijk milieu- en sociaaleconomische criteria voldoen, maar ook een "*carbon lock-in*" verhinderen. Een grote uitdaging is hoe de uitrol van een zo duurzaam mogelijke energiesector te financieren. Hier ligt een belangrijke taak weggelegd voor de internationale gemeenschap. Dit thema zal een cruciale rol spelen bij de onderhandelingen over een mondiaal klimaatakkoord, waarvoor overeenkomst bereikt moet worden over hoe ontwikkelde landen ontwikkelingslanden financieel bijstaan in klimaatmitigatie.

Tenslotte

Een radicale transformatie van ons energiesysteem is mogelijk, maar om de belangrijkste effecten van klimaatverandering te voorkómen moeten we veel sneller handelen dan we nu doen. Ik heb slechts enkele belangrijke energie-technologieën in vogelvlucht aangeduid, en een lange reeks onbenoemd gelaten, waaronder bijv. waterkracht, geothermie, en zelfs golf- en getijdenenergie. Deze technieken hebben gemeen dat ze op relatief korte termijn in principe op grote schaal ingevoerd kunnen worden. Met het oog op de lange termijn, moeten we – parallel aan toegepast onderzoek – ook fundamentele R&D doen naar een zeer brede reeks van meer revolutionaire energietechnologieën. Alleen dan kunnen ideeën, op papier of in de hoofden van wetenschappers, mogelijk tot innovaties op energie-technologisch gebied leiden.

Naast veel energietechnologieën met lage broeikasgasemissies, bestaat er een groot potentieel aan energie-efficiënties en -besparingen. Deze vormen de moeder van alle klimaatmitigatie opties. Duidelijk is dat geen enkele techniek de panacee zal zijn voor het klimaatprobleem, maar dat veel opties uit de rijke set aan alternatieven aangewend dienen te worden. Onbeantwoord is nog in welke onderlinge verhouding deze opties toegepast moeten worden, en welke kosten en andere uitdagingen deze met zich mee gaan brengen. Verdere studies zullen deze open vragen kunnen invullen. Vast staat dat klimaatverandering, en niet de mondiale eindigheid van fossiele brandstofvoorraden, het primordiale probleem is. Deze constatering is geldig, ook zonder het aanspreken van schaliegasgesteente en olie- en teerzanden, of het exploiteren van de reusachtige voorraden kolen op Aarde, die in vele soorten brandstoffen om te zetten zijn.

Ik heb in deze oratie uiteengezet wat de dimensies van het mondiale energie- en klimaatvraagstuk zijn. Gezien de complexiteit en vele aspecten ervan, dient dit vraagstuk *multidisciplinair* onderzocht te worden. Met dit soort onderzoek ga ik me de komende jaren bezig houden, *natura volente*.

Dankwoord

Aan het eind gekomen van mijn rede, zou ik enkele woorden van dank willen uitspreken. Ik zou dat allereerst willen doen naar mijn collega's van ECN, met wie ik de afgelopen 13 jaar uitstekend en met veel plezier heb kunnen samenwerken en met wie ik dat nog vele jaren hoop te kunnen blijven doen. Ik heb veel zin om, op vergelijkbare wijze, te gaan onderzoeken en doceren met mijn nieuwe collega's van de Universiteit van Amsterdam, en dank hen voor het in mij gestelde vertrouwen, in het bijzonder het College van Bestuur en de Decaan van de Faculteit. Ik hoop middels mijn simultane aanstellingen bij ECN en UvA, en dankzij de Stichting Physica, de essentiële brug te slaan tussen toegepast en fundamenteel onderzoek, beide onmisbaar om deze eeuw tot een allesomvattende verandering van ons energiesysteem te komen.

Deze ceremonie is een mooie gelegenheid om al diegenen te danken van wie ik de afgelopen 45 jaar veel geleerd heb. Ik wil m.n. noemen de leraren van mijn middelbare school, die voor mij zoveel werelden geopend hebben: zij zijn voor mij net zoveel 'hoog leraar' geweest als mijn zeer gerespecteerde mentoren op de verschillende universiteiten en instituten waar ik met zoveel plezier en passie heb mogen vertoeven.

Ik voel me vereerd met de aanwezigheid van familie en vrienden, met wie ik veel mooie dingen heb mogen beleven, en zo af en toe ook het nodige leed heb kunnen delen. Gelukkig prijs ik me met alle vriendschappen over meer dan 4 decennia die vandaag vertegenwoordigd zijn, van de Wentelwiek via Lorentz tot aan mijn studietijd in Utrecht: van jaarclub tot visclub, van Huygens tot Huis – met deze laatste verwijs ik uiteraard naar de Ridderschapstraat. Ook in dit rijtje passen de vrienden die ik gemaakt heb in de levens die ik daarna geleid heb in het buitenland, in Genève, Parijs, Bologna, beide Cambridge, San Francisco en New York, maar die hier vandaag niet aanwezig kunnen zijn.

Extreem veel dank gaat uit naar mijn beide ouders, Ad en mama, hier links respectievelijk recht tegenover mij gezeten, aan wie ik zoveel goeds te danken heb en dankzij wie ik vandaag hier op deze kathedraal sta. Bij deze dankbetuiging betrek ik ook graag mijn broer en schoonzus, Jimmie en Willemijn.

Last but not least. Lieve Sophia en Kareem, wellicht dat jullie deze oratie ooit nog eens zullen nalezen, beluisteren of bekijken, dus voor jullie een paar woorden van toelichting. Alles wat ik hier vanmiddag gezegd heb beschrijft hoe ik met mijn recente en vooral ook hopelijk toekomstige werk een poging doe om een heel kleine bijdrage te leveren aan het oplossen van één van de grote uitdagingen, in deze 21e eeuw, voor de mensheid. Voor twee mensen, jullie twee, doe ik al de rest. Aan jullie draag ik deze oratie op, in de weten-

schap dat met de wetenschap onze aanstaande energietransformatie nieuwe kansen biedt voor ons allemaal.

Ik heb gezegd.



Referenties

- Arrhenius, S., 1896, "On the Influence of Carbonic Acid in the Air Upon the Temperature of the Ground", *Philosophical Magazine*, **41**, 237-76.
- EC, 2014, "A Policy Framework for Climate and Energy in the Period from 2020 to 2030", European Commission, Brussels, Belgium.
- Fourier, J., 1824, "Remarques Générales sur les Températures du Globe Terrestre et des Espaces Planétaires", *Annales de Chimie et de Physique*, **27**, 136-67.
- GEA, 2012, *Global Energy Assessment*, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- IPCC, 2005, *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- IPCC, 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Fifth Assessment Report (AR5), Working Group I, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- IPCC, 2014, *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Fifth Assessment Report (AR5), Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Lackner, K.S., S.A. Brennan, J. Matter, A.-H. A. Park, A. Wright, B.C.C. van der Zwaan, 2012, "The Urgency of the Development of CO₂ Capture from Ambient Air", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, August 14, **109**, 33, 13156-13162.
- MacKay, D.J.C., 2009, *Sustainable Energy – without the hot air*, UIT, Cambridge, UK.
- Milanković, M., 1941, "Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem", Royal Serbian Academy, Belgrade.
- Sinke, W., 2014, "The Multi-terawatt Challenge: Preparing Photovoltaics for Global Impact", in: *The Colours of Energy*, G.J. Kramer and B. Vermeer (eds.), Shell, Amsterdam.
- Stern, N., 2007, *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Thomas, W., 2014, "Renewables on an Oil and Gas Scale: One Million Barrels of Oil Equivalent from Wind", in: *The Colours of Energy*, G.J. Kramer and B. Vermeer (eds.), Shell, Amsterdam.
- Tyndall, J., 1861, "On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours, and on the Physical Connexion of Radiation, Absorption, and Conduction", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **151**, 1-36.
- UN, 2012, "Sustainable Energy for All: A Framework for Action", United Nations, The Secretary-General's High-level Group on Sustainable Energy for All, New York.
- Van der Zwaan, B.C.C., "The Role of Nuclear Power in Mitigating Emissions from Electricity Generation", 2013, *Energy Strategies Review*, **1**, 296-301.
- Van der Zwaan, B.C.C., H. Rösler, T. Kober, T. Aboumahboub, K.V. Calvin, D.E.H.J. Gernaat, G. Marangoni, D.L. McCollum, 2013, "A Cross-Model Comparison of Global Long-Term Technology Diffusion under a 2°C Climate Change Control Target", *Climate Change Economics*, **4**, 4, 1-24.