



# Kan en zal de wereld het klimaat redden door geo-engineering?

Grootschalige en tot nu toe onbeproeefde manieren om de temperatuur op aarde te verlagen, komen wellicht snel en goedkoop beschikbaar. Is het waarschijnlijk dat deze technieken ergens in de wereld zullen worden toegepast om daarmee – in de toekomst of zelfs nu al – het klimaatbeleid overbodig te maken?

**SJAK SMULDERS**  
Hoogleraar aan  
Tilburg University

Nederland heeft zich gecommitteerd aan strikte emissiereductiedoelstellingen, maar het blijft de vraag of de doelstellingen van Parijs zullen worden gerealiseerd. Het feit dat aandelenkoersen van bedrijven nauwelijks lijken te reageren op klimaatnieuws of aangekondigd klimaatbeleid, wekt de indruk dat bedrijven en beleggers verwachten dat de soep niet zo heet zal worden gegeten (Sen en Von Schickfus 2017). Als het niet lukt om via wereldwijde emissiereductie de temperatuurstijging onder de 1,5 graden Celsius te houden (en misschien zelfs ook niet onder de 2 graden), bestaat er de mogelijkheid om de temperatuur op aarde via directe ingrepen in het klimaat te verlagen. Direct wereldwijd ingrijpen in het klimaat zou een laatste redmiddel kunnen zijn. Als we de influx van zonne-energie verlagen, daalt de temperatuur, zelfs als de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer naar recordhoogtes stijgt. Maar als we dergelijke koel-

technieken hebben, waarom zou Nederland dan alles op alles willen zetten om de emissies van broeikasgassen drastisch te reduceren? In dit hoofdstuk gaan we na of dit soort ingrepen realistisch zijn en of we er rekening mee moeten houden voordat we besluiten over grote investeringen in de emissiereducties voor Nederlandse bedrijven en huishoudens. Er kleven verschillende risico's en neveneffecten aan. Bovendien zal de inzet van deze techniek op internationaal niveau worden bepaald, dus moeten we de voor- en nadelen bekijken wat betreft de verschillende internationale spelers in het klimaatveld.

*Climate engineering*, oftewel direct ingrijpen in het klimaatsysteem en door ons vertaald als 'klimaatsturing', kunnen we indelen in twee klassen. De eerste vorm is zonlichtmanagement (*solar radiation management*) dat de mogelijkheid biedt om de temperatuur op aarde direct te beïnvloeden door het zonlicht terug te kaatsen via 'spiegeldeeltjes' in de

stratosfeer. Hoe minder zonne-energie het aardoppervlak bereikt, hoe koeler de aarde wordt. Zonlichtmanagement creëert als het ware een thermostaatknop voor het wereldklimaat. De tweede vorm is koolstofverwijdering (*carbon dioxide removal*) die versneld CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer haalt en opslaat in duurzame reservoirs. Denk bijvoorbeeld aan herbebossing, waarmee er CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer gehaald wordt die wordt opgeslagen in hout. Dit is een vorm van negatieve emissie. Beide vormen komen in dit hoofdstuk aan bod, met een korte beschrijving van de principes, de mate van toepasbaarheid, en van de kosten en risico's.

### ZONLICHTMANAGEMENT.

De uitbarsting in 1991 van de vulkaan Pinatubo in de Filipijnen, verlaagde de gemiddelde temperatuur op aarde met een halve graad Celsius. De uitbarsting in 1815 van de vulkaan Tambora in Indonesië, maakte van 1816 'het jaar zonder zomer', met misoogsten in Europa en ijs op de Grote Meren van de Verenigde Staten in juni en juli. Vulkaanuitbarstingen verlagen de temperatuur omdat ze zwaveldeeltjes (met name zwaveldioxide, SO<sub>2</sub>) in de atmosfeer brengen, die zich vervolgens snel verspreiden. De deeltjes kaatsen zonlicht terug voordat het de aarde bereikt. De weerspiegeling van het zonlicht wordt de *albedo* genoemd. Vanwege de snelle verspreiding van de deeltjes in en boven de atmosfeer kunnen lokale vulkaanuitbarstingen de albedo wereldwijd versterken, en zo de gehele aarde doen afkoelen.

Het wereldwijde koeffect van een lokale vulkaanuitbarsting kan gecontroleerd worden nagebootst door middel van de uitstoot van kleine hoeveelheden zwaveldeeltjes op zo'n twintig kilometer hoogte, in de stratosfeer. De Nederlandse Nobelprijswinnaar Paul Crutzen, expert op het gebied van zure regen, heeft uitgerekend dat deze vorm van zonlichtmanagement goed te beheersen is door de juiste dosering van zwaveldeeltjes; we hoeven dus niet bang te zijn dat zonlichtmanagement met behulp van zwaveldeeltjes resulteert in ijzige zomers. De SO<sub>2</sub> komt, net als na een vulkaanuitbarsting, binnen een paar jaar naar beneden. In feite is dit zure regen, het mondiale milieuprobleem van de jaren 1990, maar in veel kleinere omvang (Crutzen, 2006). Zwaveldeeltjes

zijn niet de enige vorm van zonlichtmanagement; de albedo kan ook worden verhoogd door wolken te creëren boven de oceanen, bijvoorbeeld door een mist van zoutwaterdruppeltjes te maken. Zonlicht dringt diep in de oceanen door en verwarmt zo het zeewater; wolken zorgen ervoor dat minder zonlicht het zeeoppervlak bereikt (Heutel et al., 2016).

### *Kosten en neveneffecten*

Zonlichtmanagement is zeer effectief en heel goedkoop. De operationele kosten zijn laag omdat de op vliegtuigen en schepen te monteren apparatuur eenvoudig en goedkoop is. De echte kosten die zonlichtmanagement met zich meebrengt, zijn niet de operationele kosten, maar de mogelijke neveneffecten en uitgelokte reacties. Deze kosten vloeien voort uit het feit dat zonlichtmanagement alleen een specifiek symptoom van het klimaatprobleem aanpakt, de te hoge temperaturen, maar niet de oorzaak, de te hoge concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer (Klepper en Rickels, 2014). Dit heeft verschillende gevolgen.

Het belangrijkste effect van zonlichtmanagement is dat de te hoge concentratie van CO<sub>2</sub> in de atmosfeer niet langer een probleem is voor de temperatuur, maar nog wel voor de ecosystemen (Moreno-Cruz en Smulders, 2017). Ook met zonlichtmanagement genereren CO<sub>2</sub>-emissies negatieve externe effecten, omdat oceanen verzuren en de temperatuur- en regenpatronen veranderen. Zonlichtmanagement kan de gemiddelde temperatuureffecten van CO<sub>2</sub> neutraliseren, maar het koelingseffect is niet gelijkmatig verdeeld over de aarde. Bij een zonlichtmanagement-inspanning die het effect van CO<sub>2</sub> op de mondiale gemiddelde temperatuur constant houdt, treedt relatief veel koeling op rond de evenaar en relatief weinig rond de polen (Bala et al., 2008). Op zich is dit geen probleem: koude landen rond de polen zullen economisch profiteren van opwarming en warme landen rond de evenaar zijn economisch gebaat bij koeling (Burke et al., 2015; Dell et al., 2012). Noordelijke landen als Canada profiteren, landen als India lijden onder hogere gemiddelde temperatuur door het broeikas effect. Als zonlichtmanagement vooral de temperatuur rond de evenaar verlaagt, maar minder rond de polen, dan wint India door klimaatsturing en ver-

liest Canada nauwelijks iets van de winst door het broeikaseffect. Beide landen kunnen in dit voorbeeld uiteindelijk beter af zijn. Moreno-Cruz et al. (2012) onderscheiden – op basis van een gekalibreerd regionaal klimaatmodel – scenario's waarin een beperkte inzet van zonlichtmanagement alle landen economisch voordeel oplevert.

Verder heeft zonlichtmanagement een effect op neerslagpatronen. Er treedt een verdroging op ten opzichte van de situatie zonder CO<sub>2</sub> en zonlichtmanagement (Ricke et al., 2010). Niettemin overheersen uiteindelijk de temperatuureffecten en lijkt vanuit een technisch oogpunt zonlichtmanagement een effectieve positieve bijdrage te kunnen leveren aan de economie, mits beperkt ingezet. Voor ecosystemen zijn de gevolgen minder positief. In het bijzonder zullen de huidige ecosystemen op de polen en evenaar waarschijnlijk verdwijnen – de biodiversiteit van de wereld verschaalt.

#### *Moreel risico en internationale verhoudingen*

Zonlichtmanagement geeft ons dus een goedkope en effectieve thermostaatknop. Maar gaan we die op de juiste manier gebruiken? En wat betekent dit voor het Nederlandse klimaatbeleid gericht op het terugdringen van broeikasemissies? Het schrikbeeld is dat het Akkoord van Parijs vaarwel wordt gezegd, en een situatie ontstaat waarin ieder land naar eigen voorkeur de thermostaatknop nog een stukje lager kan zetten dan de andere landen al hebben gedaan. Het logische resultaat is dat het land dat het meest profiteert van koeling het resultaat bepaalt. De archipel Tuvalu in de Stille Oceaan, waarvan het voortbestaan wordt bedreigd door zeespiegelstijging, kiest in dat scenario een inspanning aan zonlichtmanagement die voor alle andere landen excessief is. Weitzman (2015) noemt dit het *'free-driver'*-probleem. Ieder land kan tegen lage kosten het stuurwiel overnemen en legt daarmee aan alle andere landen een externaliteit op. Dit als tegenstelling van het *'free-rider'*-probleem, waarbij niemand het stuurwiel wil overnemen omdat de maatregelen in eigen land duur zijn ten opzichte van de eigen voordelen, met wachtgedrag als gevolg.

Het lijkt onwaarschijnlijk dat een land als Tuvalu het zonlichtmanagement van de wereld gaat dicteren. Internationale verontwaardiging zal niet uitblijven en boycotten zullen

ingesteld worden, zoals in reactie op nucleaire programma's en schendingen van afspraken over kernwapens (Schelling, 1996). Omdat landen met relatief kleine klimaatschade het economische en politieke overwicht in de wereld hebben, zullen deze de overige landen waarschijnlijk kunnen afhouden van het drastische gebruik van zonlichtmanagement.

#### *Risico's en koolstofkaters*

Verschillende andere potentiële neveneffecten van zonlichtmanagement maken grootschalig gebruik in de nabije toekomst onwaarschijnlijk. Het is een onbeproeft technologie, en dat maakt dat we voorzichtig moeten zijn met de toepassing omdat we niet alle gevolgen kunnen overzien. Zelfs ontwikkeling van de technologie op zich is riskant, omdat het uitproberen altijd consequenties heeft op wereldschaal.

## **De temperatuur op aarde kan direct beïnvloed worden door zonlicht terug te kaatsen**

De grote intuïtieve weerstand tegen wereldwijd experimenteren met het klimaat via zonlichtmanagement, is vooral geïnstigeerd door de mogelijke neveneffecten op het gebied van het klimaat zelf en van de ecosystemen. Met zonlichtmanagement gaan we spelen met de natuur. Klimaatbeleid is juist ingegeven door de zorg dat de mens op de natuur een te grote invloed heeft, die ons bestuurlijk vermogen overstijgt. Zonlichtmanagement lijkt een kunstmatige ingreep om een kunstmatige beïnvloeding van het milieu ongedaan te maken. Als we beginnen met zonlichtmanagement zijn we er voor eeuwen van afhankelijk. Als we toestaan dat er te veel CO<sub>2</sub> in te atmosfeer komt, moeten we deze kunstmatige ingreep vele eeuwen volhouden om zo het temperatuureffect van het teveel aan CO<sub>2</sub> in de atmosfeer blijvend te corrigeren. Dit lijkt vergelijkbaar met een permanent kernafvalprobleem. Al deze zaken roepen weerstand en wrevol op.

De intuïtieve weerstand is gerechtvaardigd binnen een context van onzekerheid en kansen op grote onvoorziene neveneffecten. Als na een aantal jaren of decennia blijkt dat de neveneffecten van zonlichtmanagement te groot zijn, moeten we ermee stoppen. Maar als we ermee zijn begonnen, zitten we met een groter probleem dan wanneer we nooit zonlichtmanagement hadden ingezet. Dit argument suggereert dat we de techniek misschien nooit in zullen gaan zetten omdat, als we ermee beginnen, we er verslaafd aan raken – en moeten we ermee stoppen dan zijn we ten prooi aan een ‘koolstofkater’. Zolang zonlichtmanagement wordt ingezet, is de reductie van CO<sub>2</sub>-emissies niet nodig om de mondiale temperatuurstijging in de hand te houden. Dure emissiereductiemaatregelen blijven achterwege. Maar hierdoor zal tijdens de inzet van zonlichtmanagement de voorraad CO<sub>2</sub> in de atmosfeer zich ophopen. Als het zonlichtmanagement moet stoppen, is de temperatuurstijging die volgt veel groter, en ook sneller, dan zonder zonlichtmanagement. De snelle stijging van de temperatuur is een groot probleem op zich, omdat het aanpassen van zowel de economie als de ecosystemen veel tijd kost (zie ook de bijdrage van Richter en Groeneveld aan deze preadviezen). Er is dus een afruil tussen een traditioneel klimaatbeleid zonder zonlichtmanagement en snelle afbouw van emissies, en een riskant klimaatbeleid met een langzame afbouw van emissies en zonlichtmanagement – met het risico van een extra probleem als zonlichtmanagement niet werkt zoals gehoopt.

Om de koolstofkater te voorkomen, mag de inzet van zonlichtmanagement de inspanningen aan CO<sub>2</sub>-reducties niet verminderen. Het is daarom vooral een middel achter de hand voor het geval dat het plotseling blijkt dat, zelfs bij de grootste inspanning voor emissiereducties, temperaturen harder gaan stijgen dan acceptabel – een zogenaamde ‘hoge klimaatgevoeligheid’ (Crutzen, 2006). Zonlichtmanagement zou dan kunnen worden ingezet om tijdelijk de wereld te koelen, totdat er voldoende negatieve emissies en adaptatie zijn gerealiseerd.

Zonlichtmanagement fungeert dan als verzekering tegen extreme klimaatonzekerheid (Emmerling en Tavoni, 2018). Om het morele risico (*moral hazard*) te voorkomen

dat de optie van zonlichtmanagement leidt tot een vertraagde emissiereductie, moet het duidelijk zijn dat zonlichtmanagement alleen kan worden ingezet om risico's af te dekken die niet meer kunnen worden afgewend door emissiereductie (Klepper en Rickels, 2014).

## KUNSTMATIGE CO<sub>2</sub>-VERWIJDERING

Klimaatsturing neemt de vorm aan van CO<sub>2</sub>-verwijdering (*carbon dioxide removal*, CDR), als we kunstmatig de capaciteit en snelheid verhogen waarmee de aarde CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer haalt. We noemen dit ook wel ‘negatieve emissies’ (zie ook de bijdrage van Van Vuuren aan deze preadviezen). Het verbranden van fossiele brandstoffen in combinatie met opvang en opslag van CO<sub>2</sub> draagt niet bij aan negatieve emissies. CDR vergt drie noodzakelijk stappen: afvang, opslag en voorkomen dat de CO<sub>2</sub> opnieuw vrijkomt.

Bebossing is de gemakkelijkst voor te stellen vorm van CDR. Bomen nemen CO<sub>2</sub> uit de lucht op (afvang) en zetten het om in biomassa (opslag). Zolang de bomen blijven staan of het hout wordt gebruikt voor duurzame toepassingen (denk aan kozijnen) blijft de CO<sub>2</sub> opgeslagen. Wordt het hout later gekapt en verbrand, dan is er uiteindelijk geen sprake van negatieve emissies omdat de laatste noodzakelijke stap voor CDR ontbreekt.

De meest futuristische vorm is *direct air capture*, waarbij industriële installaties CO<sub>2</sub> uit de lucht halen. Opslag vindt dan plaats door de CO<sub>2</sub> vast te leggen in ondergrondse geologische rotsformaties die daarvoor geschikt zijn en geen CO<sub>2</sub> laten weglekken naar de atmosfeer. Ook is voorgesteld om specifieke rotsen te vermalen zodat er een groot oppervlak ontstaat dat CO<sub>2</sub> kan absorberen. De meest praktische toepassing is de productie van bio-energie gecombineerd met afvang en opslag. Een andere optie is om ijzerdeeltjes toe te voegen aan de oceanen zodat algen meer CO<sub>2</sub> opnemen.

Smith et al. (2016) geven een mooi overzicht van de verschillende CDR-mogelijkheden. Zij concluderen dat *direct air capture* kostbaar is omdat de verschillende stappen veel energie kosten. Bebossing kost niet zozeer energie, maar kan gevolgen hebben voor de waterhuishouding en watercyclus, en het heeft veel ruimte nodig. Bio-energie met afvang-

en-opslag levert energie op, maar heeft opnieuw gevolgen voor de waterhuishouding en ecosystemen. Niettemin blijft de optie van bio-energie met afvang-en-opslag de meest realistische.

### *Kosten en neveneffecten*

Anders dan zonlichtmanagement pakt CDR de oorzaak van het probleem van klimaatverandering aan. Dat is veelbelovend. Twee nadelen zijn echter dat de techniek traag werkt en kostbaar is. Klepper en Rickels (2014) beargumenteren dat CDR inherent duur is. De kosten om een eenheid CO<sub>2</sub> te verwijderen zouden kunnen dalen over de tijd, maar er zijn geen schaalvoordelen te verwachten. De verwijderingskosten van CO<sub>2</sub> zijn altijd hoger dan de kosten van het voorkomen van de uitstoot. De kosten nemen bovendien meer dan proportioneel toe met de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die uit de atmosfeer moet worden gehaald. Een belangrijke reden is landgebruik. Productie van biobrandstoffen gecombineerd met koolstofafvang en -opslag is de meest realistische manier van CDR, maar zal, bij grootschalige toepassing, het landgebruik en de voedselproductie sterk beïnvloeden. Vaughan et al. (2018) berekenen in hun scenario's dat vier procent van het totale landoppervlak op aarde nodig is voor CDR om de temperatuur te stabiliseren op 1,5 graad. Omdat land voor landbouw maar een deel van het totale landoppervlak kan beslaan, betekent dit een relatief grotere impact op het landareaal voor de voedselproductie. Als bio-energie wordt geproduceerd op land dat niet in gebruik is voor landbouw, zal dat de waterhuishouding sterk veranderen en ecosystemen belasten. Het vervangen van bosareaal, met eigen CO<sub>2</sub>-opslag, voor de productie van bio-energie lijkt ook niet zinvol. Klimaatveranderingen bedreigen ecosystemen en de voedselproductie, maar CDR zorgt ook voor risico's. CDR levert niet zozeer een oplossing, als wel een nieuw dilemma.

Bovendien spelen hier weglek-effecten een belangrijke rol (zie ook de bijdrage van Poelhekke aan deze preadviezen). CDR via (her)bebossing of het opschorten van boskap in één land kan de vraag naar hout verschuiven naar andere hout producerende landen en daar leiden tot extra boskap. Een tweede probleem is dat CDR via bebossing alleen effectief

is als de opgeslagen CO<sub>2</sub> later niet opnieuw weer in de atmosfeer komt. Bossen moeten blijven staan en niet door latere overheden worden gekapt. Vaughan et al. (2018) wijzen erop dat het grootste potentieel voor (her)bebossing is gesitueerd in landen met zwakke politieke instituties. CDR is in deze landen slechts beperkt geloofwaardig.

## **CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag lijkt op de korte termijn geen alternatief voor emissiereductie**

CDR met geologische opslag van CO<sub>2</sub> is ook beperkt vanwege de benodigde capaciteit en concentratie in bepaalde regio's. Deze vorm van CDR genereert vraag naar transport-systemen om broeikasgassen te vervoeren van afvang naar opslag. Bedrijven met expertise op het gebied van gaspijpleidingen kunnen nieuwe markten aanboren, wat relevant is voor de Nederlandse expertise. Maar er is ook weerstand onder de Nederlandse bevolking. De test met opslag van CO<sub>2</sub> in Barendrecht heeft het imago van CDR geschaad. Nieuwe technologieën kosten tijd, niet alleen om de techniek operationeel te maken, maar ook om betrokkenen te informeren en inspraak te geven. Opslag onder zee is een alternatief. De opslagtechnieken zijn nog lang niet uitontwikkeld, en voor de korte termijn lijkt CDR geen grootschalig alternatief voor emissiereductie.

### *Instrumentering en prikkels*

Welke economische instrumenten kunnen CDR-toepassing en -innovatie in de goede richting en samenstelling sturen? Terwijl bij zonlichtmanagement vooral internationale onderhandelingen en afspraken het (eventuele) gebruik zullen moeten reguleren, kan voor CDR een marktgerichte benadering effectief zijn. CDR kan decentraal worden georganiseerd omdat ze is uit te voeren in kleine projecten en in projecten van verschillende aard, bijvoorbeeld herbebossingsprojecten

en commerciële bio-energieproductie. Een uniforme koolstofprijs is in principe een goede manier om niet alleen de uitstoot te verminderen, maar ook om de CDR te bevorderen. Dan zou de koolstofprijs dus geheven moeten worden op basis van de daadwerkelijke (netto-)emissies, en op alleen de koolstofinhoud van bijvoorbeeld grondstoffen of brandstoffen. Er is een meetsysteem nodig om te weten welk deel van deze koolstofinhoud als emissies in de atmosfeer komt en welk deel er wordt afgevangen en opgeslagen. Alleen het eerste deel moet worden belast. Een soort van statiegeldsysteem kan hiervoor zorgen (Fullerton en Wolverton, 2005). Daarbij betaalt de gebruiker voor brandstoffen een belasting naar rato van hun koolstofinhoud, maar krijgt hij een belastingteruggave naar rato van de bewezen afvang van CO<sub>2</sub>. De 'belastingteruggave' kan worden vormgegeven door certificaten voor bebossing en andere vormen van CDR.

Deze subsidie voor afvang van CO<sub>2</sub> is niet gelijk aan de prijs van CO<sub>2</sub> die vervuilers betalen. We moeten hier het mantra van de 'uniforme koolstofprijs' zorgvuldig herformuleren. Efficiëntie vereist dat er een (te betalen) uniforme prijs is voor CO<sub>2</sub> in de atmosfeer, maar de (te ontvangen) prijs voor de opslag van CO<sub>2</sub> wijkt hiervan af. De laatste is zelf niet uniform, maar hangt af van de betreffende opslagplaats. De opslag in ieder specifiek reservoir heeft eigen lokale milieu-effecten, risico's en neveneffecten. De prijs voor opslag weerspiegelt de vermindering van de CO<sub>2</sub>, maar ook de eventuele specifieke externe effecten verbonden aan de specifieke opslag. (Lafforgue et al., 2008). Zo kan opslag in de oceaan andere risico's met zich meebrengen dan herbepbossing, en is

er ruimte voor specifieke subsidies. In de praktijk zal een verandering van de CO<sub>2</sub>-prijs zich natuurlijk wel moeten vertalen in een verandering van de CO<sub>2</sub>-opslag-subsidie, omdat de CO<sub>2</sub>-prijs de belangrijkste component is – en zelfs bij een conservatieve inschatting van het weglekken van CO<sub>2</sub> uit geologische formaties blijft CO<sub>2</sub>-opslag aantrekkelijk (Van der Zwaan en Gerlagh, 2009).

#### *Moreel risico*

CDR is dus beschikbaar in verschillende vormen en decentraal aan te sturen. Om de wereldeconomie klimaatneutraal te maken, is het noodzakelijk om onvermijdbare broeikasgasemissies te compenseren met negatieve emissies. Het vooruitzicht van CDR geeft ook een moreel risico. Anderson en Peters (2016) laten zien dat veel klimaatbeleidsscenario's veronderstellen dat de toekomstige kosten van CDR laag zijn. Zij waarschuwen dat het onwaarschijnlijk is dat de technologieën voor negatieve emissie de veronderstellingen kunnen waarmaken. Maximale onmiddellijke reductie van CO<sub>2</sub>-emissies blijft noodzakelijk. Er staat te veel op het spel.

#### **CONCLUSIE VOOR NEDERLAND**

Hoe belangrijk is directe klimaatsturing voor Nederland? De beslissing over de inzet van zonlichtmanagement wordt niet genomen binnen Nederland, maar ons land moet wel nadenken en anticiperen op mogelijke gevolgen. Ook al lijkt zonlichtmanagement aantrekkelijk vanwege de lage kosten en directe voordelen, onze conclusie is dat er grote bezwaren zijn en dat we niet moeten verwachten dat het op grote

#### **In het kort**

- ▶ Geo-technieken zijn beschikbaar, maar zullen de reductie van CO<sub>2</sub>-uitstoot niet grootschalig kunnen vervangen.
- ▶ Verwijderen van CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer, oftewel negatieve emissies, wordt duur bij toepassing op grote schaal.
- ▶ Zonlicht-terugkaatsing is technisch gesproken goedkoop, maar brengt risico's en neveneffecten met zich mee.

schaal toegepast gaat worden. Zonlichtmanagement werkt imperfect en ‘symptomatisch’, roept enorme weerstand op, en geeft internationale frictie en onbekende risico’s.

Evenmin zijn grootschalige negatieve emissies realistisch in de toekomst. Voor CDR zijn er bij gericht beleid weliswaar kostendalingen te verwachten, mede omdat opslag van CO<sub>2</sub> op decentraal niveau plaatsvindt, blootstaat aan marktselectie en vatbaar is voor prijsprikkels. Maar, als negatieve emissies op grote schaal nodig zijn, zullen de kostendalingen teniet worden gedaan door de schaalnadelen vanwege land-

gebruik. Negatieve emissies zijn noodzakelijk om de wereld klimaatneutraal te maken, maar ze zijn geen substituuat voor de benodigde emissieverminderingen.

Nederland moet niet verwachten dat magische futuristische technieken de noodzaak verminderen voor sterk direct klimaatbeleid. Wel kan Nederland inspelen op de toekomstige markt voor technieken voor negatieve emissie door tijdig te investeren in CO<sub>2</sub>-opvang en -opslag en door de huidige geologische en boortechnische expertise in deze opkomende industrie toe te passen.

## LITERATUUR

- Anderson, K. en G. Peters (2016) The trouble with negative emissions. *Science*, 354(6309), 182–183.
- Bala, G., P.B. Duffy en K.E. Taylor (2008) Impact of geoengineering schemes on the global hydrological cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(22), 7664–7669.
- Burke, M., S.M. Hsiang en E. Miguel (2015) Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527, 235–239.
- Crutzen, P.J. (2006) Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change*, 77(3–4), 211–220.
- Dell, M., B.F. Jones en B.A. Olken (2012) Temperature shocks and economic growth: evidence from the last half century. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 4(3), 66–95.
- Emmerling, J. en M. Tavoni (2018) Climate engineering and abatement: a ‘flat’ relationship under uncertainty. *Environmental and Resource Economics*, 69(2), 395–415.
- Fullerton, D. en A. Wolverson (2005) The two-part instrument in a second-best world. *Journal of Public Economics*, 89(9–10), 1961–1975.
- Heutel, G., J. Moreno-Cruz en K. Ricke (2016) Climate engineering economics. *Annual Review of Resource Economics*, 8(1), 99–118.
- Klepper, G. en W. Rickels (2014) Climate engineering: economic considerations and research challenges. *Review of Environmental Economics and Policy*, 8(2), 270–289.
- Lafforgue, G., B. Magné en M. Moreaux (2008) Energy substitutions, climate change and carbon sinks. *Ecological Economics*, 67(4), 589–597.
- Moreno-Cruz, J.B. en S. Smulders (2017) Revisiting the economics of climate change: the role of geoengineering. *Research in Economics*, 71(2), 212–224.
- Moreno-Cruz, J.B., K.L. Ricke en D.W. Keith (2012) A simple model to account for regional inequalities in the effectiveness of solar radiation management. *Climatic Change*, 110(3–4), 649–668.
- Ricke, K.L., M.G. Morgan en M.R. Allen (2010) Regional climate response to solar-radiation management. *Nature Geoscience*, 3(8), 537–541.
- Schelling, T.C. (1996) The economic diplomacy of geoengineering. *Climatic Change*, 33(3), 303–307.
- Sen, S. en M.-T. von Schickfus (2017) Will assets be stranded or bailed out? Expectations of investors in the face of climate policy. CESifo working paper 238, te vinden op [www.cesifo-group.de](http://www.cesifo-group.de).
- Smith, P., S.J. Davis, F. Creutzig et al. (2016) Biophysical and economic limits to negative CO<sub>2</sub> emissions. *Nature Climate Change*, 6, 42–50.
- Vaughan, N.E., C. Gough, S. Mander en D.P. van Vuuren (2018) Evaluating the use of biomass energy with carbon capture and storage in low emission scenarios. *Environmental Research Letters*, 13(4), 044014.
- Weitzman, M. (2015) A voting architecture for the governance of free-driver externalities, with application to geoengineering. *The Scandinavian Journal of Economics*, 117(4), 1049–1068.
- Zwaan, B. van der, en R. Gerlagh (2009) Economics of geological CO<sub>2</sub> storage and leakage. *Climatic Change*, 93(3–4), 285–309.