



Technology Assessment

Klimaatengineering: hype, hoop of wanhoop?

Monique Riphagen en Frans Brom (red.)

Rathenau Instituut

ORNA kennis
veranderend
interactief
debat
technology & society

Het Rathenau Instituut stimuleert de publieke en politieke meningsvorming over wetenschap en technologie. Daartoe doet het instituut onderzoek naar de organisatie en ontwikkeling van het wetenschapsysteem, publiceert het over maatschappelijke effecten van nieuwe technologieën, en organiseert het debatten over vraagstukken en dilemma's op het gebied van wetenschap en technologie.

Klimaatengineering: hype, hoop of wanhoop?

© Rathenau Instituut, Den Haag, 2013

Rathenau Instituut
Anna van Saksenlaan 51

Postadres:
Postbus 95366
2509 CJ Den Haag

Telefoon: 070-342 15 42
Telefax: 070-363 34 88
E-mail: info@rathenau.nl
Website: www.rathenau.nl

Uitgever: Rathenau Instituut
Eindredactie: Cathalijne Boland
Ontwerp en opmaak: Boven de Bank, Amsterdam
Coverbeeld: Image Select
Drukwerk: Drukkerij Groen, Hoofddorp

Dit boek is gedrukt op FSC gecertificeerd papier.

Eerste druk: december 2013

ISBN/EAN: 978-90-77364-51-2

Deze publicatie kan als volgt worden aangehaald/ Preferred citation:
Riphagen, M. en F. Brom (red.), Klimaatengineering: hype, hoop of wanhoop?,
Den Haag, Rathenau Instituut 2013

Het Rathenau Instituut heeft een Open Access beleid. Rapporten, achtergrondstudies, wetenschappelijke artikelen, software worden vrij beschikbaar gepubliceerd. Onderzoeksgegevens komen beschikbaar met inachtneming van wettelijke bepalingen en ethische normen voor onderzoek over rechten van derden, privacy, en auteursrecht.

Verveelvoudigen en/of openbaarmaking van (delen van) dit werk voor creatieve, persoonlijke of educatieve doeleinden is toegestaan, mits kopieën niet gemaakt of gebruikt worden voor commerciële doeleinden en onder voorwaarde dat de kopieën de volledige bovenstaande referentie bevatten. In alle andere gevallen mag niets uit deze uitgave worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie of op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het Rathenau Instituut.

Klimaatengineering: hype, hoop of wanhoop?

Redactie:

Monique Riphagen en Frans Brom

Bestuur Rathenau Instituut

mw. G.A. Verbeet (voorzitter)

prof. dr. E.H.L. Aarts

prof. dr. ir. W.E. Bijker

prof. dr. R. Cools

dr. H. Dröge

drs. E.J.F.B. van Huis

prof. dr. H.W. Lintsen

prof. mr. J.E.J. Prins

prof. dr. M.C. van der Wende

mr. drs. J. Staman (secretaris)

Voorwoord

In 2009 organiseerde het Rathenau instituut een burgerforum met honderd Nederlandse burgers om over klimaatverandering te discussiëren. Dit burgerforum was het Nederlandse onderdeel van het wereldwijde burgerforum World Wide Views on Global Warming. In 38 landen gingen per land honderd burgers met elkaar in discussie over het onderwerp klimaatverandering en leverden zo input aan het klimaatonderhandelingsproces in Kopenhagen. De voorbereidende discussie, de discussie op de dag zelf en de vragen en opmerkingen die het instituut kreeg, gaven ons aanleiding om dieper op het klimaatdebat in te gaan. Zeker toen in de pers Climategate losbarstte, werd ons duidelijk dat de verhouding tussen de klimaatwetenschap, de politiek en de media nadere analyse behoefde. In 2010 publiceerde het Rathenau Instituut het rapport *Ruimte voor klimaatdebat*.

In de discussie tussen klimaatwetenschappers, politici en de media speelt klimaatengineering (ook wel geo-engineering of in het Engels *climate engineering*) een bijzondere rol. Vanuit de vrees dat de politiek niet in staat is om de klimaatverandering met bestaande middelen in goede banen te leiden, stellen sommige klimaatwetenschappers klimaatengineering als radicale oplossing voor. Klimaatengineering behelst het bewust en grootschalig ingrijpen in het klimaatsysteem om de door de mens veroorzaakte klimaatverandering tegen te gaan. Denk hierbij aan technologieën die zonlicht weren en aan technologieën die CO₂, het belangrijkste broeikasgas, uit de lucht halen en opslaan. Aanvankelijk leek het onderwerp sciencefiction, maar gaandeweg bleek dat een groeiend aantal wetenschappers aan verschillende technologieën werkt en dat klimaatengineering onderwerp is van serieuze wetenschappelijke discussie. Klimaatengineering roept daarbij niet alleen natuurwetenschappelijke vragen op, maar vraagt ook om ethische en juridische reflectie, en om een verkenning van politiek-bestuurlijke opties.

Internationaal is er politiek-bestuurlijke aandacht voor het onderwerp. Zo kwam al in 2009 een rapport van de Britse Royal Society uit. Sindsdien is een hausse aan internationale beleidsrapporten verschenen, met name in de Verenigde Staten, Groot-Brittannië en Duitsland. Ook in internationale politieke onderhandelingen staat het onderwerp inmiddels op de agenda. In de discussie over het Biodiversiteitsverdrag en over het Verdrag van Londen speelt het nu een rol. En in het meest recente rapport van werkgroep I van het IPCC wordt het expliciet genoemd.

Tegen deze achtergrond heeft het Rathenau Instituut het project klimaatengineering opgezet. Met dit rapport willen wij een bijdrage leveren aan het politieke en maatschappelijke debat over klimaatengineering in Nederland. Wij

concluderen dat klimaatengineering op korte termijn geen perspectief biedt om de klimaatverandering binnen aanvaardbare grenzen te houden. Wel kunnen de verschillende technologieën om CO₂ uit de lucht te halen en op te slaan op termijn een bijdrage leveren. De technologieën moeten daarvoor verder ontwikkeld worden en er dient een internationaal kader ontwikkeld te worden waarin deze technologieën een plaats krijgen. Het koelen van de aarde door zonlicht te weerkaatsen biedt echter geen oplossing. Het verlaagt de temperatuur hooguit tijdelijk, maar laat de onderliggende mechanismen intact. Daarom is het alleen een tijdelijke noodmaatregel als de klimaatverandering veel extremer wordt dan nu de verwachting is.

Met dit rapport willen wij een bijdrage leveren aan de standpuntbepaling over klimaatengineering van stakeholders, beleidsmakers en de politiek, met het oog op de internationale discussie over klimaatverandering.

Jan Staman

Directeur

Inhoudsopgave

Voorwoord	5
1 Klimaatengineering	9
<i>Monique Riphagen, Bart Verheggen, Marcus Düwell</i>	
1.1 Inleiding	9
1.2 Klimaatvraagstuk	10
1.3 Gangbare handelingsstrategieën	17
1.4 De opkomst van klimaatengineering	22
1.5 Klimaatengineering: de technologieën	25
1.6 Overkoepelende kenmerken van klimaatengineerings-technologieën	31
1.7 Ethische vragen	35
Kaders	39
2 Presentatie van klimaatengineering in onderzoeksrapporten	52
<i>Samantha Scholte, Monique Riphagen, Edwin Horlings</i>	
2.1 Inleiding	52
2.2 Waarom rapporteren over klimaatengineering?	54
2.3 Gehanteerde definities van klimaatengineering	56
2.4 Besproken technologieën	57
2.5 Argumenten pro klimaatengineering	61
2.6 Beoordeling technologieën	62
2.7 Smalle spreiding aan bronnen	64
2.8 Hoe groot is de wetenschappelijke basis van klimaatengineering?	65
2.9 Conclusie	71
3 Discussie over klimaatengineering	74
<i>Monique Riphagen</i>	
3.1 Inleiding	74
3.2 Klimaatengineering in de media	75
3.3 Houding van burgers	77
3.4 Nederlandse stakeholders in het klimaatdebat	78
3.5 Conclusie	83
Interviews	87
4 Ethische vragen rond klimaatengineering	130
<i>Marcus Düwell, Annemarie Bijloos, Vincent van Gool</i>	
4.1 Inleiding	130
4.2 Zijn de intenties achter klimaatengineering moreel juist?	131

4.3	Is klimaatengineering geoorloofd als je de gevolgen niet kent?	134
4.4	Ethische richtlijnen voor toekomstig beleid rond klimaatengineering	138
4.5	Conclusie	141
5	Bestaande regulering van klimaatengineering	143
	<i>Jonathan Verschuuren, Floor Fleurke, Monique Riphagen</i>	
5.1	Inleiding	143
5.2	Regulering van klimaatengineering	146
5.3	Internationaal gewoonterecht	147
5.4	Mensenrechtenverdragen	152
5.5	Specifieke aandacht voor klimaatengineering in milieuverdragen	153
5.6	Algemene (milieu)verdragen die van invloed zijn op klimaatengineering	163
5.7	Conclusie	172
6	Slot	176
	<i>Monique Riphagen, Frans Brom</i>	
6.1	Inleiding	176
6.2	SRM en CDR	177
6.3	Debat over SRM	178
6.4	Regulering van SRM	180
6.5	Moratorium op SRM	181
6.6	Onderzoek naar SRM	182
6.7	Debat over CDR	183
6.8	Nadelen CDR	183
6.9	CDR als aanvulling op mitigatie	184
6.10	Onderzoek en regulering	185
	Geraadpleegde literatuur	187
	Over de auteurs	200
	Begeleidingscommissie	203
	Dankwoord	204
Bijlage 1	Beleidsrelevante toekomstige kantelementen in het klimaatsysteem	205
Bijlage 2	Geanalyseerde (beleids)rapporten; overzicht instituten	207
Bijlage 3	Diversiteit aan input in rapporten	210
Bijlage 4	Zoektermen voor klimaatengineering in het Web of Science	213
Bijlage 5	Overzicht geïnterviewde stakeholders	215
Bijlage 6	Verslag expertmeeting 'De governance van klimaatengineering'	218

1 Klimaatengineering

Monique Riphagen, Bart Verheggen, Marcus Düwell

1.1 Inleiding

Sinds eind jaren tachtig staat klimaatverandering door menselijke invloed, ook wel antropogene klimaatverandering genoemd, politiek en maatschappelijk op de agenda. Nationaal en internationaal vinden er diverse beleidsinspanningen plaats om de uitstoot van broeikasgassen te beperken. De belangrijkste van deze gassen, CO₂, komt met name vrij door de verbranding van fossiele brandstoffen als olie, kolen en gas. Door een hogere concentratie aan CO₂ houdt de atmosfeer meer warmte vast en stijgt de gemiddelde temperatuur op aarde. Mitigatiebeleid is gericht op voorkomen of beperken van de CO₂-uitstoot. Adaptatiebeleid is gericht op aanpassing aan de gevolgen van klimaatverandering, bijvoorbeeld door dijkverhoging.

Meerdere landen hebben een klimaatbeleid opgesteld dat op mitigatie en adaptatie is gericht. Ook op internationaal niveau vinden intensieve onderhandelingen plaats om de bestaande afspraken uit het Kyoto-protocol aan te scherpen en te vernieuwen. Ondanks deze inspanningen zijn de bestaande mitigatiemaatregelen volgens de rapporten van het klimaatpanel van de Verenigde Naties, het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), onvoldoende om een opwarming van de aarde binnen redelijke adaptatiegrenzen te houden.

Sinds het nieuwe millennium bestaat er daarom vanuit de wetenschap en de politiek belangstelling voor een derde manier om met klimaatverandering om te gaan, namelijk klimaatengineering (of: geo-engineering). In het rapport *Geo-engineering the Climate. Science, governance and uncertainty* van de Britse Royal Society wordt klimaatengineering gedefinieerd als 'het groot-schalig en intentioneel ingrijpen in het klimaatsysteem van de aarde om antropogene klimaatverandering tegen te gaan'.¹ Deze definitie wordt inmiddels breed gehanteerd.

Klimaatengineering is bepaald niet onomstreden, gezien de risico's die samenhangen met grootschalige ingrepen in het klimaatsysteem. Tegelijkertijd moet worden vastgesteld dat zeer uiteenlopende technologieën onder de noemer klimaatengineering worden geschaard. Van sommige is de toepassing omkeer-

1 'Geoengineering, or the deliberate large-scale manipulation of the planetary environment to counteract anthropogenic climate change (...)' (The Royal Society 2009, p.1).

baar, van andere niet. Ook de (neven)effecten kunnen sterk verschillen, waardoor een categorisch oordeel over klimaatengineering niet zinvol is.

Om dit allemaal te verduidelijken, behandelen we in dit hoofdstuk een aantal aspecten van het begrip klimaatengineering. In paragraaf 1.2 bespreken we eerst hoe het klimaatsysteem in elkaar zit, op welke wijze de mens dit systeem beïnvloedt en wat daarvan de gevolgen kunnen zijn. Deze informatie is nodig om te begrijpen hoe de verschillende vormen van klimaatengineering op het klimaatsysteem ingrijpen, waarom je dat überhaupt zou willen, en welke effecten dat zou kunnen hebben.

Vooralsnog wordt het antwoord op het klimaatprobleem vooral gezocht in mitigatie en adaptatie. In paragraaf 1.3 gaan we in op de internationale afspraken over mitigatie en op de CO₂-reductiedoelstellingen zoals die voor Nederland gelden. Ook beschrijven we hoe Nederland deze doelstellingen probeert te bereiken en hoe dat proces tot nu toe verloopt. Zijn de internationale en nationale mitigatieambities sterk genoeg? Hoe effectief is ons adaptatiebeleid?

In paragraaf 1.4 gaan we in op de opkomst van het onderwerp klimaatengineering in het debat over klimaatverandering.

Klimaatengineering is een paraplubegrip voor uiteenlopende technologieën. In paragraaf 1.5 gaan we in op het onderscheid tussen Solar Radiation Management (SRM) en Carbon Dioxide Removal (CDR). Daarna geven we een overzicht van de meest besproken technologieën, die zowel *low tech* als *high tech* van aard kunnen zijn. In aparte kaders wordt meer uitleg gegeven over de technologieën met de meeste potentie.

In paragraaf 1.6 beschrijven we de overkoepelende kenmerken van de verschillende technologieën, die afgeleid zijn uit de definitie van klimaatengineering door The Royal Society. Het gaat om schaalgrootte, tijdsbestek, reversibiliteit en de intentie waarmee de technologieën zouden worden ingezet. Door deze algemene kenmerken heeft klimaatengineering gevolgen die ethische vragen oproepen. In paragraaf 1.7 gaan we hier alvast kort op in. In paragraaf 1.8 ten slotte trekken we conclusies en geven we een overzicht van de opbouw van dit rapport.

1.2 Klimaatvraagstuk

Het feit dat de aandacht voor klimaatengineering toeneemt, wordt wel verklaard uit een groeiende zorg van klimaatwetenschappers over de opwarming van de aarde. In deze paragraaf beschrijven we de gangbare opvattingen in de klimaatwetenschap over de oorzaken en gevolgen van deze klimaatverandering. We gaan in dit rapport overigens niet of nauwelijks in op de argumenten van

klimaatseptici², omdat ook klimaatengineers zich op de huidige stand van de klimaatwetenschap baseren (zoals gerepresenteerd door het IPCC). Een aantal klimaatengineers vindt de prognoses van het IPCC zelfs te conservatief en gaat van een extremere opwarming uit, zoals Peter Wadhams, hoogleraar oceanografie in Cambridge en wetenschappelijk adviseur van de Arctic Methane Emergency Group (AMEG). De uitleg in deze paragraaf over het mechanisme waardoor de aarde opwarmt is binnen de klimaatwetenschap breed geaccepteerd en relatief oncontroversieel.

1.2.1 Het broeikaseffect

Broeikasgassen zoals CO_2 en waterdamp vormen een belangrijke schakel in het klimaatstelsel van de aarde. Zij houden een deel van de energie van de zon vast, waardoor niet al deze energie wordt gereflecteerd naar het heelal.

Figuur 1.1 laat schematisch zien hoe het broeikaseffect werkt. De aarde ontvangt energie van de zon, waarvan een deel wordt gereflecteerd. Een ander deel wordt door de aarde opgenomen en vervolgens weer uitgestraald als infrarode (warmte)straling. Broeikasgassen houden deze infrarode straling vast. Bij een hogere concentratie aan broeikasgassen, een dikkere deken zogenoemd, kan de aarde minder warmte kwijt en warmt ze op.

Figuur 1.1 Een weergave van het broeikaseffect

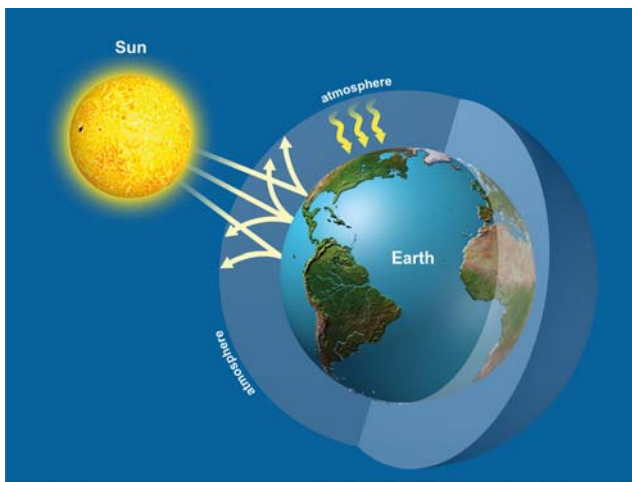


Foto: Shutterstock

- 2 De klimaatseptici betwijfelen in verschillende gradaties de opvattingen binnen de gangbare klimaatwetenschap, en zijn van mening dat het klimaat niet of nauwelijks opwarmt of dat deze opwarming niet of nauwelijks door de mens veroorzaakt wordt. In het Rathenau-rapport Ruimte voor klimaatdebat. Zicht op interactie tussen klimaatpolitiek, wetenschap en media van Jeroen P. van der Sluijs, Rinie van Est en Monique Riphagen wordt ingegaan op het debat tussen de gangbare klimaatwetenschap en de klimaatseptici (2010).

De meeste broeikasgassen komen van nature voor in de lucht, waardoor er een natuurlijk broeikaseffect bestaat. Hierdoor is het op aarde zo'n 33 graden warmer dan zonder broeikasgassen het geval zou zijn. Kooldioxide (CO_2) is een van de belangrijkste broeikasgassen. Sinds de industriële revolutie is veel CO_2 uitgestoten door met name verbranding van fossiele brandstoffen, ontbossing en cementproductie. Dit heeft geleid tot een toename van de CO_2 -concentratie van 280 tot 400 ppm (parts per million, een maat voor de concentratie). Andere broeikasgassen zoals methaan en lachgas komen vrij door landbouw, industriële processen en energieopwekking. Door al deze activiteiten is de figuurlijke deken van broeikasgassen dikker geworden en houdt die nog meer energie vast, wat onder andere is aangetoond door satellietmetingen.

1.2.2 Mate van opwarming

Sinds het einde van de negentiende eeuw is de temperatuur op aarde met gemiddeld ongeveer 0,8 graden Celsius toegenomen. Volgens het vierde rapport van het IPCC (AR4) kan het grootste deel van deze gemeten opwarming gerelateerd worden aan de verhoogde concentratie aan CO_2 en andere broeikasgassen in de atmosfeer (IPCC 2007). Hiermee is volgens de IPCC een verband aangetoond tussen de uitstoot van broeikasgassen door menselijke activiteiten en de opwarming van de aarde. Deze conclusie is gebaseerd op een combinatie van vier elementen, namelijk basale natuurkunde, modelsimulaties, de belangrijke rol die broeikasgassen in het verre verleden hebben gespeeld, en diverse observaties die specifiek op de rol van broeikasgassen wijzen.

Het opwarmende effect van broeikasgassen is op zichzelf een relatief eenvoudig verhaal. Het wordt lastiger om uitspraken te doen over de mate waarin de aarde hierdoor zal opwarmen. Ook volgens het nieuwste IPCC-rapport zal de temperatuur uiteindelijk waarschijnlijk tussen de 1,5 en de 4,5 graden stijgen als de concentratie aan CO_2 zich verdubbelt ten opzichte van het pre-industriële tijdperk (dat wil zeggen, als de concentratie stijgt tot 560 ppm en dan stabiel zou blijven). Als de concentratie aan CO_2 nog verder stijgt, zal de temperatuurstijging ook hoger uitvallen (IPCC 2013).

De mate van opwarming is afhankelijk van de manier waarop de aarde reageert op de hogere concentratie aan broeikasgassen. In het klimaatstelsel vinden feedbacks of terugkoppelingen plaats, die positief (versterkend) of negatief (dempend) van aard kunnen zijn. Een voorbeeld van een positief feedbackmechanisme is de invloed van waterdamp. Bij elke graad die de temperatuur stijgt, verdampt er meer water, waardoor de concentratie aan waterdamp in de atmosfeer toeneemt. Omdat waterdamp een broeikasgas is, wordt de opwarming door dit feedbackmechanisme nog eens versterkt. Zo zijn er meer feedbackmechanismen, waarvan niet in alle gevallen precies bekend is welke invloed ze op het klimaatstelsel zullen hebben. Een exacte voorspelling van de temperatuurstijging is dan ook moeilijk te geven. De opwarming die we in de toekomst kunnen verwachten hangt af van de toekomstige emissies (een

maatschappelijke onzekerheid) en van het antwoord van het klimaatsysteem op deze emissies (een natuurkundige onzekerheid).

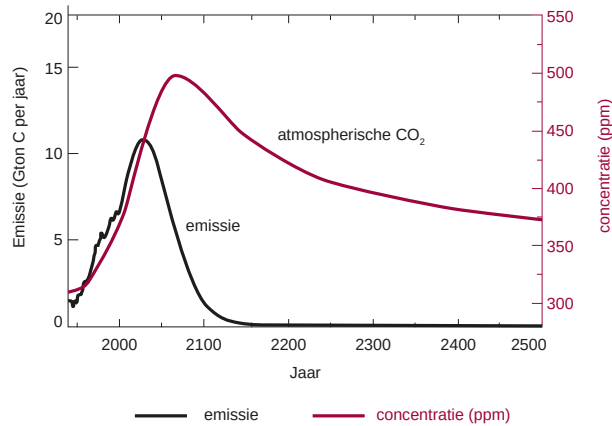
Verschillende scenario's beschrijven, met alle onzekerheden van dien, de relatie tussen de uitstoot van diverse broeikasgassen en de verwachte temperatuurstijging. Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) meldt een mondiale uitstoot van 34 miljard ton CO₂ in 2011 (Olivier, Janssens-Maenhout & Peters 2012), een uitstoot die overeenkomt met de hoogste emissiescenario's van het IPCC. Klimaatwetenschappers gaan ervan uit dat de temperatuurstijging zich niet zal kunnen beperken tot twee graden als stevige emissiereducties niet op korte termijn bereikt worden. Politici hebben tijdens de klimaatonderhandelingen in Kopenhagen (in 2009) afgesproken dat de temperatuur niet met meer dan twee graden mag stijgen, omdat het anders moeilijk wordt om de gevolgen van klimaatverandering op te vangen met adaptatiemaatregelen.

1.2.3 Tijdsschaal

Klimaatwetenschappers zijn bezorgd over de stijging van de concentratie aan CO₂, omdat het erg lang duurt voordat CO₂ weer wordt opgenomen door het aardsysteem. De CO₂-concentratie in de atmosfeer is van nature aan fluctuaties onderhevig. CO₂ wordt uitgestoten en opgenomen door planten. Dit resulteert in een dynamisch evenwicht en een dagelijkse en seizoensgebonden variatie in concentratie. CO₂ komt ook vrij door vulkaanuitbarstingen en wordt vervolgens weer opgenomen door oceanen en gesteenten. De diepzee en gesteenten zijn grote sinks van CO₂, maar leggen het gas langzaam, respectievelijk zeer langzaam vast. Klimaatengineers willen dit natuurlijke proces versnellen door toepassing van verschillende CDR-technologieën (zie de technologiebeschrijvingen in de kaders aan het einde van dit hoofdstuk).

Omdat het natuurlijke opnameproces zo langzaam verloopt, heeft de extra menselijke uitstoot een lange verblijftijd in de atmosfeer. Een deel blijft zelfs tienduizenden jaren in de lucht aanwezig. Hierdoor zal de temperatuur van de aarde ook nadat de uitstoot van broeikasgassen sterk is verminderd, nog lange tijd verhoogd blijven. Afkoeling verloopt daardoor veel trager dan opwarming. Dit maakt klimaatbeleid zo lastig. Om tijdig effect te sorteren, zou de uitstoot van broeikasgassen al sterk gereduceerd moeten worden op het moment dat de gevolgen van de uitstoot nog niet in volle sterkte ervaren worden.

Figuur 1.2 laat zien dat emissiereductie een sterk vertraagd effect heeft en dat het vele eeuwen kan duren voordat de CO₂-concentratie weer is gedaald tot onder de huidige concentratie van 400 ppm - en nog veel langer voordat het is gedaald tot de pre-industriële waarde van 280 ppm. Ook als de CO₂-emissies op een gegeven moment sterk naar beneden zouden gaan (zwarte lijn), zal de CO₂-concentratie nog duizenden jaren hoger blijven dan de pre-industriële waarde (rode lijn).

Figuur 1.2 De emissie van broeikasgassen en de concentratie CO₂ in de tijd.

Bron: Tans (2009)

Rathenau Instituut

Wat zijn nu de gevolgen van klimaatverandering door uitstoot van broeikasgassen, en in hoeverre zijn die problematisch?

1.2.4 Gevolgen van klimaatverandering

De gevolgen van klimaatverandering zijn divers en afhankelijk van de mate van opwarming. Met name op regionale schaal zijn de gevolgen nog heel onzeker. Wel is duidelijk dat de gevolgen per regio sterk kunnen verschillen. Gebieden op hogere breedtegraden kunnen bij een beperkte opwarming netto voordeel ondervinden van klimaatverandering, terwijl landen die zich dichterbij de evenaar bevinden vooral negatieve gevolgen zullen ervaren. Bij een opwarming van meer dan twee graden verwacht men echter dat de negatieve gevolgen wereldwijd groter zullen zijn dan de positieve effecten ervan. Daarbij komt dat de gevolgen over het algemeen groter zullen zijn naarmate de opwarming toeneemt: de gevolgen nemen meer dan lineair toe met de opwarming.

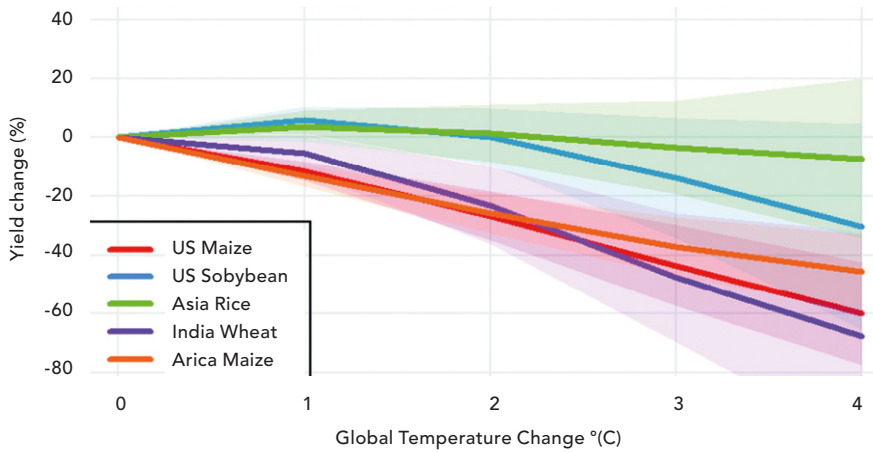
De opwarming zal in ieder geval consequenties hebben voor verschillende ecosystemen, de waterhuishouding, de voedselvoorziening, de gezondheid van mens en dier en de kustveiligheid.

In grote lijnen is de verwachting dat gematigde klimaatzones natter zullen worden en gebieden dichterbij de evenaar droger. De biodiversiteit zal naar alle waarschijnlijkheid afnemen. De verzuring van de oceanen (een CO₂-effect) heeft bijvoorbeeld invloed op koraal.

De opbrengst van gewassen vertoont een optimum bij een bepaalde temperatuur. Bij een geringe opwarming kan de opbrengst licht stijgen, maar bij een opwarming van meer dan één tot twee graden zal de oogst naar verwachting dalen. Deze afname is het sterkst in tropische gebieden, terwijl de opbrengst

in koudere regio's (zoals bijvoorbeeld Rusland) bij opwarming nog een tijd kan blijven stijgen. Figuur 1.3 laat zien dat de reactie op een temperatuurstijging per gewas sterk verschilt, waardoor de gevolgen voor de voedselvoorziening mede afhankelijk zijn van het soort gewas dat in een bepaalde regio veel wordt verbouwd.

Figuur 1.3 Opbrengst van enkele gangbare gewassen in relatie tot mondiale opwarming.



Bron: National Research Council (2011)

Rathenau Instituut

Een toename in hittegolven zal meer slachtoffers vergen. Daar staat tegenover dat een afname van koudegolven mensenlevens spaart. Inschattingen over het netto-effect van beide tendensen lopen uiteen. Het verspreidingsgebied van bepaalde ziektes kan zich vergroten, maar dit is mede-afhankelijk van vele andere factoren, die zich soms gemakkelijker laten beïnvloeden dan het klimaat. Ten slotte heeft een stijging van de zeespiegel consequenties voor de kustveiligheid en voor het risico op overstromingen.

De gevolgen van klimaatverandering zijn kortom sterk afhankelijk van de mate van opwarming en van de regio waarin men zich bevindt. Met name de warmere regio's en laag liggende delta's lijken het kwetsbaarst te zijn. En juist de warmere regio's beschikken in het algemeen over minder capaciteit en middelen om de gevolgen van deze veranderingen op te vangen.

1.2.5 Kantelpunten

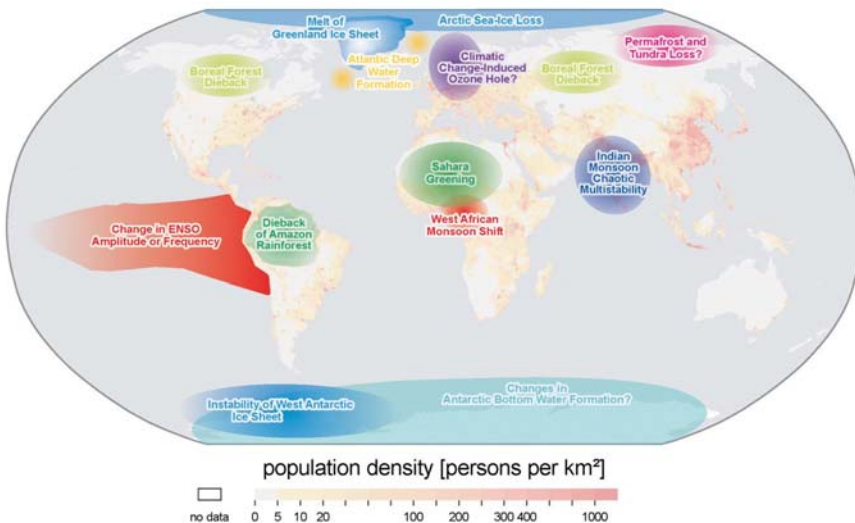
We hebben het eerder gehad over de feedbacks (terugkoppelingsmechanismen) die de opwarming van de aarde kunnen versterken. Tipping points (kantelpunten) zijn grote feedbackmechanismen die onomkeerbare veranderingen in het klimaatstelsel kunnen veroorzaken. Deze onomkeerbare veranderingen kunnen optreden als bepaalde kritische waarden worden overschreden. Een

kantelpunt kan een versnelde klimaatverandering in gang zetten die de mens niet meer in de hand heeft. Een voorbeeld is het afsmelten van het zeeijs op de Noordpool. Een ijsvrije Noordpool reflecteert veel minder zonlicht, waardoor meer straling de aarde kan bereiken. Dit zal de opwarming verder versnellen (Lenton et al. 2008).

Er zijn meerdere tipping points aangewezen, die zich bij verschillende temperatuurstijgingen voor kunnen doen. Bij sommige kantelpunten voltrekt de kanteling zich binnen tien jaar, bij andere kan dit proces tientallen tot honderden jaren duren. Figuur 1.4 geeft een overzicht van de belangrijkste kantelpunten, zoals het afsterven van het Amazone-regenwoud of veranderingen in de Aziatische of Afrikaanse moesson (ibid.). De gevolgen van het passeren van deze kantelpunten zijn heel verschillend. Zo kan het versneld afsmelten van de grote ijskappen op Groenland en West-Antarctica tot een zeespiegelstijging van meerdere meters leiden. De tijdschaal waarop dit zou gebeuren wordt echter geschat op meer dan driehonderd jaar (ibid.). Over het algemeen nemen de kantelingen die mondiaal het ingrijpendst zijn ook de meeste tijd in beslag. Zie voor een overzicht van mogelijke kantelpunten inclusief tijdsperiodes en gevolgen bijlage 1.

Over het optreden van kantelpunten bestaat grote wetenschappelijke onzekerheid en kantelpunten zijn dan ook onderwerp van wetenschappelijke discussie. Algemeen wordt echter aangenomen dat verdere klimaatverandering niet te voorkomen is als een kantelpunt eenmaal is bereikt. Daarom is het optreden van kantelpunten een soort ijkpunt geworden. De dreiging van een versnelde opwarming (door het bereiken van een kantelpunt) is voor sommige klimaat-engineers een belangrijke reden om onderzoek te doen naar klimaatengineering. Het middel kan dan eventueel worden ingezet om erger te voorkomen. Zo wil de Arctic Methane Emergency Group (AMEG) voorkomen dat het zeeijs in het noordpoolgebied afsmelt, omdat hierdoor grote hoeveelheden methaan vrij zouden kunnen komen. Methaan is een sterk broeikasgas, en het vrijkomen ervan zou weer kunnen leiden tot verdere, onomkeerbare klimaatverandering (www.ameg.org; Duarte et al. 2012). AMEG pleit daarom voor het op korte termijn koelen van de Noordpool door middel van Solar Radiation Management, om zo te voorkomen dat dit kantelpunt optreedt. Maar volgens anderen is het afsmelten van het Arctische zeeijs in principe omkeerbaar (Notz 2009) en vindt dit bovendien langzamer plaats dan de onderzoekers van AMEG denken.

Figuur 1.4 Wereldkaart met de relevantste kantelpunten voor het klimaatsysteem. Ook de bevolkingsdichtheid is aangegeven.



Bron: Lenton et al. (2008)

Het is niet goed in cijfers uit te drukken hoe groot de kans is dat kantelpunten daadwerkelijk zullen optreden. In de wetenschappelijke literatuur lijkt men het erover eens te zijn dat het passeren van een kantelpunt niet kan worden uitgesloten. Het is daarom een potentieel gevolg van toenemende broeikasgas-emissies, waar in een afweging van risico's rekening mee moet worden gehouden.

1.3 Gangbare handelingsstrategieën

Om de uitstoot aan CO₂ en andere broeikasgassen terug te dringen en de effecten van klimaatverandering te beperken, hebben veel landen een klimaatbeleid opgesteld. Dit bestaat meestal uit een combinatie van mitigatie en adaptatie. Mitigatie is typisch een internationale aangelegenheid, omdat de emissies van met name CO₂ een mondiaal effect hebben. Het effect van mitigatie is eveneens mondiaal, maar traag. Adaptatie daarentegen is typisch een nationale of regionale gelegenheid, omdat klimaatverandering regiospecifieke gevolgen heeft. Adaptatie heeft snel effect, maar zet de klimaatverandering zelf niet stil. Hieronder bespreken we de belangrijkste nationale en internationale mitigatiedoelstellingen, en ook de beleidsmaatregelen op het gebied van mitigatie en adaptatie.

1.3.1 Internationale mitigatiedoelstellingen

In 1992 is het VN-Raamverdrag klimaatverandering (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) vastgesteld en sindsdien door bijna alle landen in de wereld geratificeerd (Sluijs, Van Est & Riphagen 2010). Dit Raam-verdrag heeft tot doel 'het stabiliseren van atmosferische broeikasgasconcentraties tot een niveau dat gevaarlijke verstoring van het klimaatsysteem voorkomt' (UNFCCC 1992).

In het Raamverdrag is vastgelegd dat de geïndustrialiseerde landen hun broeikasgasemissies zullen moeten gaan beperken, waarbij de ontwikkelingslanden nog wat ruimte krijgen om te groeien. In 1997 is het Kyoto-protocol vastgelegd, een operationalisatie van het Raamverdrag. Onder het Kyoto-protocol moesten de geïndustrialiseerde landen in de periode 2008-2012 hun broeikasgasemissies met gemiddeld vijf procent terugbrengen ten opzichte van 1990 (<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>).

Niet alle landen hebben het Kyoto-protocol geratificeerd; onder andere de Verenigde Staten en Canada niet. In de praktijk hebben alleen Europa en Australië zich aan de doelstellingen gecommitteerd. Van deze beperkte groep landen heeft niet elk land de doelstelling gehaald in de afgelopen periode. Het Raamverdrag voorziet niet in een mechanisme om de verplichte emissiereducties te handhaven.

Het vervolg op Kyoto zou in 2009 in Kopenhagen worden vastgesteld. Het lukte de deelnemende landen echter niet om bindende afspraken te maken over emissiereducties, waarna het Kyoto-protocol is verlengd tot 2020. De beperkte groep landen die deze verlenging hebben geratificeerd, hebben zich verplicht tot een vermindering van achttien procent van hun uitstoot in 2020 ten opzichte van 1990.

Onder het Kyoto-protocol zijn opkomende economieën als Brazilië, India en China (de BRIC-landen) niet gebonden aan emissiereducties. Dit maakt het niet waarschijnlijk dat de mondiale emissies de komende decennia zullen dalen. Om de doelstelling van maximaal twee graden opwarming te halen, is het volgens het IPCC echter nodig dat de CO₂-uitstoot in 2050 met vijftig tot 85 procent is verminderd ten opzichte van 1990, en zich stabiliseert op 450 ppm. Sommige klimaatwetenschappers zijn van mening dat de CO₂-concentratie beter onder de 350 ppm kan blijven om 'gevaarlijke verstoring van het klimaatsysteem' te voorkomen (Hansen 2008). Recent is de CO₂-concentratie de 400 ppm gepasseerd. Het is dus onmogelijk om binnen afzienbare tijd de 350 ppm-doelstelling te halen, zonder CO₂ uit de atmosfeer te halen. En het grootschalig uit de atmosfeer halen van CO₂ is een vorm van klimaatengineering.

De EU wil in 2050 tachtig tot 95 procent minder CO₂ uitstoten ten opzichte van 1990. Een tussendoelstelling van een reductie van veertig procent is voorzien

voor 2030 (European Commission 2013). Deze overall-doelstelling is vertaald naar reductiedoelen voor de afzonderlijke lidstaten. Volgens verschillende routekaarten is de EU-doelstelling technisch haalbaar, maar zijn forse en tijdige inspanningen nodig.

De emissiereducties zoals ze nu in VN-verband zijn vastgelegd, zijn in ieder geval niet voldoende om de opwarming tot maximaal twee graden te beperken (UNEP 2012). Verschillende studies voorspellen dat deze doelstelling binnenkort praktisch onhaalbaar wordt (IEA 2013; Stocker 2012).

1.3.2 Reductie van kortlevende broeikasgassen en roet

In internationaal verband wordt ook gesproken over de emissiereductie van andere broeikasgassen dan CO_2 , namelijk de kortlevende broeikasgassen en roet.³ Omdat deze broeikasgassen korter in de atmosfeer blijven dan CO_2 , heeft emissiereductie sneller effect. Dit biedt een extra mogelijkheid om de mondiale opwarming af te remmen, nu de internationale onderhandelaars tijd nodig hebben om uit de impasse te raken wat de CO_2 -emissiereductie betreft. Als men zich echter alleen op de reductie van overige broeikasgassen en roet zou concentreren, leidt dit weliswaar tot minder opwarming op korte termijn, maar blijft de opwarming op langere termijn (onder invloed van CO_2) gewoon doorgaan. Hoewel de reductie van overige broeikasgassen en roet dus een bijdrage kan leveren aan het beperken van klimaatverandering, kan het geen vervanging zijn van CO_2 -emissiereductie. En men vreest juist dat aandacht voor de mitigatie van overige broeikasgassen en roet ten koste gaat van aandacht voor de mitigatie van CO_2 (Pierrehumbert 2010).

1.3.3 Nationale mitigatiedoelstellingen

Ook Nederland heeft het Kyoto-protocol ondertekend en moest zes procent minder CO_2 uitstoten in de periode 2008-2012. Dit is naar verwachting gehaald, ook door deze emissiereductie gedeeltelijk in het buitenland te realiseren en emissierechten aan te kopen. Om te kunnen voldoen aan de EU-doelstellingen in 2050 zullen we de CO_2 -uitstoot in Nederland opnieuw flink naar beneden moeten brengen.

Hiertoe zal een omslag moeten plaatsvinden naar een koolstofarme economie. Het huidige kabinet heeft zichzelf ten doel gesteld om het aandeel duurzame (hernieuwbare) energie in 2020 te hebben verhoogd tot veertien procent. Of deze doelstelling gerealiseerd wordt, is mede afhankelijk van het tijdig (2013-2014) aanbesteden van windenergieparken, het vaststellen van bindende beleidskaders en het creëren van het noodzakelijke maatschappelijke draagvlak. De cruciale energiebronnen zijn wind op zee (5 GW nodig in 2020), wind op land (7 GW nodig in 2020) en de bijsmaak van biomassa in kolencentrales (veertig

3 Mondelinge mededeling door Ronald Flipphi, beleidsambtenaar Ministerie van Infrastructuur en Milieu.

procent nodig in 2020) (Hekkenberg & Lensink 2013). Dit zijn forse toenames in vergelijking met de huidige capaciteit, voor wind op zee bijvoorbeeld met meer dan een factor twintig. Het huidige kabinet heeft geen plannen om in 2013 te beginnen met de aanbesteding van windenergieprojecten op zee. Daarmee komt volgens Hekkenberg & Lensink de haalbaarheid van de doelstelling in het geding.

In september 2013 is het Energieakkoord voor duurzame groei afgesloten. Ruim veertig organisaties, waaronder de overheid, werkgevers, de vakbeweging, natuur- en milieuorganisaties, andere maatschappelijke organisaties en financiële instellingen hebben zich aan dit akkoord verbonden. De belangrijkste doelstellingen zijn onder andere: een energiebesparing van 1,5 procent per jaar resulterend in honderd petajoule in 2020 en veertien procent duurzame energie in 2020, dat groeit naar zestien procent in 2023.

1.3.4 Beleidsinstrumenten

Verschillende beleidsinstrumenten worden ingezet bij het terugdringen van de CO₂-uitstoot, namelijk het beprijzen van emissies, belastingen en andere fiscale regelgeving, subsidies, normstellingen, convenanten en stimuleringsmaatregelen. We noemen hier enkele voorbeelden.

Emissiehandelssysteem

Bij een emissiehandelssysteem (*cap and trade*) kunnen emissierechten worden verhandeld tegen een variabele CO₂-prijs, waardoor marktwerking ontstaat. Er wordt een in de tijd afnemend emissieplafond vastgesteld waardoor de CO₂-uitstoot afneemt. De EU heeft een emissiehandelssysteem (ETS) opgezet waar veel kritiek op wordt uitgeoefend. De huidige CO₂-prijs is erg laag, waardoor de prikkel ontbreekt om minder CO₂ uit te stoten. Door de economische crisis is er namelijk een overschot aan emissierechten ontstaan. De EU heeft onlangs besloten om tijdelijk emissierechten uit de markt te nemen, om de CO₂-prijs op die manier te laten stijgen. Ongeveer de helft van de Europese CO₂-emissies vallen onder het ETS (elektriciteitsproductie, raffinaderijen en grote industrie). Het aantal emissierechten binnen het ETS neemt per jaar af, echter onvoldoende om de EU-doelstelling van tachtig tot 95 procent emissiereductie in 2050 te behalen.

CO₂-heffing

Bij een directe CO₂-heffing (*carbon tax*) krijgt CO₂ een vaste prijs en kan de uitstoot variëren (Dorland, Dubelaar-Versluis & Jansen 2011). Een CO₂-heffing geeft weliswaar een stabiele CO₂-prijs (belangrijk voor investeringsbeslissingen), maar de daarmee te behalen emissiereductie is niet vooraf bekend (belangrijk voor beleidsmakers). Een hogere CO₂-prijs (hetzij door een directe heffing, hetzij door een emissiehandelssysteem) kan op weerstand stuiten van met name de energie-intensieve sectoren.

Normen

Door middel van normen, denk aan energielabels en de ecodesignrichtlijn, wordt een maximum gesteld aan het energieverbruik van apparaten. Auto's worden zuiniger doordat op Europees niveau CO₂-emissienormen zijn vastgesteld voor nieuwe voertuigen. Ook is afgesproken om in de reguliere brandstoffen voor tien procent aan biobrandstoffen bij te mengen. Met Energie Prestatie Normen stelt de overheid eisen aan de energieprestatie van gebouwen.

Subsidies

De subsidieregeling SDE+ stimuleert de productie van hernieuwbare energie. Er kan subsidie worden aangevraagd voor de productie van hernieuwbare elektriciteit, hernieuwbare warmte of groen gas. Het beschikbaar gestelde bedrag hiervoor is door het huidige kabinet substantieel verhoogd. Ook is er subsidie voor investeringen in energiebesparing.

Convenanten

Convenanten zijn vrijwillige afspraken die meestal gesloten worden tussen de industrie en de overheid, bijvoorbeeld om energiebesparing in sociale huurwoningen te realiseren. Het wegnemen van blokkades is ook belangrijk. Daar zijn bijvoorbeeld de 'Green Deals' voor bedoeld.

1.3.5 Adaptatie

Naast het beperken van toekomstige klimaatverandering door mitigatiebeleid, is adaptatiebeleid nodig om ons aan te passen aan de gevolgen van klimaatverandering. Adaptatiebeleid is vooral een nationale of regionale aangelegenheid en hangt samen met de specifieke kwetsbaarheid en het aanpassingsvermogen van een land of regio. Dit aanpassingsvermogen is sterk afhankelijk van de institutionele capaciteit en van de beschikbare financiële middelen. In ontwikkelingslanden, waar de effecten van klimaatverandering naar verwachting het sterkst zullen zijn, ontbreekt het hier echter vaak aan.

Adaptatie is opgenomen in het VN-Raamverdrag, maar niet in verplichtende zin. De VN adviseert landen een adaptatiebeleid op te stellen en uit te voeren en ondersteunt hierin (UNFCCC 1992). Bij de Europese Commissie staat klimaatadaptatie hoog op de agenda (Europese Commissie 2009). De Europese lidstaten moeten uiterlijk in 2017 een nationale adaptatiestrategie opstellen en in onderling overleg doelstellingen en maatregelen formuleren voor het managen van overstromingsrisico's (PBL 2012). Daarnaast is er op Europees niveau veel aandacht voor het integreren van klimaat in de bestaande EU-richtlijnen (zoals Natura 2000, Kaderrichtlijn Water, Hoogwater-richtlijn) en voor kennisontwikkeling op het gebied van adaptatie. De invulling van de adaptatiemaatregelen laat Europa aan de lidstaten over.

De Algemene Rekenkamer heeft in 2012 een evaluatie uitgebracht van het Nederlands adaptatiebeleid (Algemene Rekenkamer 2012). Hierin uit het

instituut kritiek op het adaptatiebeleid van Nederland. Zo is de nationale adaptatiestrategie uit 2007, hoewel toegezegd, nooit uitgewerkt in een adaptatieagenda met concrete maatregelen en wordt het klimaatbeleid als geheel niet gecoördineerd, gemonitord of geëvalueerd (ibid.). Op een aantal beleids-terreinen is het onderwerp adaptatie volgens de Rekenkamer goed verankerd. Zo worden de watergerelateerde onderwerpen uitgevoerd in het kader van het Deltaprogramma uit 2010 en is er relatief veel aandacht voor de ruimtelijke aanpassing aan klimaatverandering. Er is echter weinig tot geen beleid met betrekking tot de risico's van klimaatverandering voor ecosystemen en biodiversiteit, energie, transport en gezondheid. Denk aan hittestress en het toenemen van bepaalde ziektes (ibid.; PBL 2012a).

Volgens het Planbureau voor de Leefomgeving zijn de effecten van klimaatverandering in Nederland bij het huidige tempo van klimaatverandering in beginsel beheersbaar (PBL 2012a). Als de opwarming echter zal versnellen, waardoor zich worst case-scenario's zullen voltrekken, dan bereiken we de grenzen van ons aanpassingsvermogen. Volgens de Rekenkamer 'zijn niet alle risico's en kwetsbaarheden waaraan ons land blootstaat, afgedekt' (Algemene Rekenkamer 2012, p. 7).

1.4 De opkomst van klimaatengineering

1.4.1 Opkomst van klimaatengineering in het klimaatdebat

De twee bovenstaande paragrafen hebben laten zien dat klimaatverandering door het merendeel van de klimaatwetenschappers als een urgent en ernstig probleem wordt beschouwd. Tegelijkertijd zijn mitigatiestrategieën internationaal niet erg succesvol. De uitstoot van CO₂ is tussen 1990 (het 'ijkjaartal') en 2011 met bijna 48 procent gestegen en adaptatiebeleid staat nog in de kinderschoenen, zowel in internationaal als in nationaal opzicht (PBL 2012b).

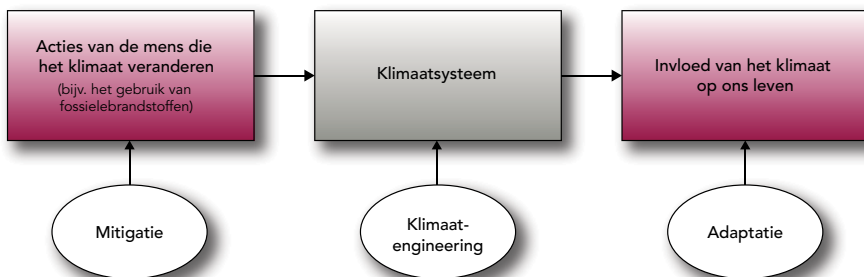
Tijdens de VN-klimaattop in Kopenhagen in 2009 stonden wereldleiders voor de taak een nieuw klimaatakkoord te sluiten, als vervolg op het Kyoto-protocol uit 1997. Hierin moesten afspraken worden opgenomen over bindende CO₂-emissiereducties. Dit mislukte. Wel werd afgesproken dat de aarde niet meer dan twee graden mag opwarmen. Grote spelers als China, de VS en Rusland wilden zich niet vastleggen op emissiereducties om hun economische groei niet in gevaar te brengen. Hoewel het Kyoto-protocol op een vervolgconferentie in Durban is verlengd, is er volgens klimaatwetenschappers - gezien de groeicijfers van onder meer China - nauwelijks discussie mogelijk over de vraag of de temperatuurstijging zich aan het eind van deze eeuw inderdaad tot deze twee graden beperkt zal hebben; dit lijkt onwaarschijnlijk.

Sinds het falen van de onderhandelingen in Kopenhagen heerst er onder deze wetenschappers een afnemend vertrouwen in de internationale politiek waar het om mitigatie gaat. De maatschappelijke respons op de boodschap van het

IPCC, dat CO₂-reductie noodzakelijk is om klimaatverandering te beperken, is gering. De energietransitie die ingezet zou moeten worden, komt volgens klimaatwetenschappers amper van de grond (Rasch et al. 2008).

Tegen deze achtergrond van een toenemende zorg over antropogene klimaatverandering en een volgens velen falende internationale klimaatpolitiek groeit de interesse voor en discussie over andere methoden om de effecten van klimaatverandering te beperken of tegen te gaan. Een deel van deze methoden valt onder geo-engineering of klimaatengineering. Met deze beide termen wordt hetzelfde bedoeld; ze gaan dus ook over dezelfde technologieën. Wij geven in dit rapport de voorkeur aan de term klimaatengineering, omdat die duidelijker maakt dat de bedoelde technologieën ingrijpen in het klimaatstelsel. Klimaatengineering gaat om diverse soorten technologieën die niet gericht zijn op het voorkomen van de uitstoot van broeikasgassen (mitigatie) of op de aanpassing aan klimaatverandering (adaptatie), maar op het beïnvloeden van het klimaatstelsel zelf.

Figuur 1.5 Verhouding klimaatengineering tot mitigatie en adaptatie



Aangepast uit Olson 2011

Rathenau Instituut

1.4.2 Historie van klimaatengineering als wetenschappelijke discipline

Klimaatengineering wordt vaak vergeleken met weermodificatie. Door de overeenkomsten in technologieën, wetenschappelijke traditie en debat gaat deze vergelijking wel enigszins op (Keith 2000). Het weer is echter niet hetzelfde als het klimaat. Het weer is elke dag anders, het klimaat gaat over het gemiddelde weerpatroon in een periode van dertig jaar. Ook de intentie waarmee het wordt ingezet verschilt. Weermodificatie heeft tot doel: ingrijpen in het weersysteem. Een voorbeeld hiervan is het versneld laten uitregenen van wolken, om zo de opbrengst van de oogst te vergroten. Klimaatengineering heeft tot doel: het beperken of voorkomen van de gevolgen van eerder menselijk ingrijpen, namelijk de grootschalige uitstoot van CO₂.

In 1965 publiceerde de Amerikaanse President's Science Advisory Committee het eerste rapport waarbij klimaatverandering gedefinieerd werd als probleem (President's Science Advisory Committee 1965). Als oplossing werd niet gesproken over het terugdringen van de CO₂-uitstoot, maar over het verhogen van de reflectiviteit van het aardoppervlak (Reynolds 2011). De mitigatie van CO₂ werd onhaalbaar geacht, omdat dit consequenties zou hebben voor economische groei. In de jaren hierna werden verschillende opties op het gebied van klimaatengineering verder uitgewerkt. In 1977 stelde de Russisch klimatoloog Budyko voor aerosolen in de stratosfeer te brengen om zonlicht tegen te houden en kwam de Italiaan Marchetti met een voorstel voor de opslag van CO₂ in de diepzee (ibid.).

In de jaren tachtig en negentig werd mitigatie de dominante oplossingsstrategie voor het klimaatprobleem, waardoor klimaatengineering naar de achtergrond verdween. Het internationaal gedeelde politieke gevoel van urgentie over het klimaatprobleem resulteerde in 1992 in het VN-Raamverdrag klimaatverandering (UNFCCC) (The Royal Society 2009). Ondanks een rapport van de Amerikaanse National Academy of Sciences over klimaatverandering uit 1992 waarin een hoofdstuk aan diverse vormen van klimaatengineering werd gewijd (zie hoofdstuk 2), bleef de belangstelling voor klimaatengineering beperkt. Het wetenschappelijk onderzoek ging echter wel door, zij het op beperkte schaal. Het onderwerp klimaatengineering bevond zich wetenschappelijk gezien in een taboesfeer. De motieven van de degenen die zich ermee bezighielden werden gewantwoord, en ook heerste er scepsis over de uitvoerbaarheid van de technologieën.

De definitieve doorbraak van het onderwerp klimaatengineering in bredere kring is te danken aan de Nederlandse Nobelprijswinnaar Paul Crutzen.⁴ Crutzen zette klimaatengineering in 2006 definitief op de kaart met een editorial essay in *Climatic Change* over de mogelijkheid de aarde te koelen met sulfaataerosolen (Crutzen 2006). Nu een Nobelprijswinnaar een pleidooi hield voor onderzoek naar klimaatengineering, ontstond ook vanuit de sociale en politieke wetenschappen een toenemende belangstelling voor het onderwerp. In zijn artikel noemde Crutzen mitigatie de belangrijkste oplossing voor het klimaatprobleem. Hij zag echter weinig reden tot hoop op internationale overeenstemming over mitigatiedoelstellingen (ibid.). Hij zette klimaatengineering neer als een noodmaatregel die we achter de hand moeten hebben voor het geval dat mitigatie faalt en we geconfronteerd worden met de eventuele grootschalige gevolgen van een extreem klimaatscenario. Deze 'framing' van klimaatengineering wordt door het merendeel van de klimaatengineers gedeeld.

4 Paul Crutzen ontving in 1995 de Nobelprijs voor zijn werk naar de afbraak van de ozonlaag.

Tot slot lijkt het erop dat The Royal Society, een Britse organisatie van vooraanstaande wetenschappers, door het uitbrengen van een rapport over klimaat-engineering een soort startsein heeft gegeven voor een hausse aan beleidsrapporten over het onderwerp. Hiermee is klimaatengineering sinds 2009 definitief op de internationale onderzoeks- en beleidsagenda komen te staan.

1.5 Klimaatengineering: de technologieën

Klimaatengineering is een containerbegrip voor uiteenlopende technologieën die het broeikaseffect tegengaan. Die technologieën zijn in eerste instantie in twee clusters te verdelen, namelijk Solar Radiation Management (SRM) en Carbon Dioxide Removal (CDR). Onder SRM vallen de technologieën die het inkomende zonlicht blokkeren, waardoor dat het aardoppervlak niet meer kan bereiken. SRM heeft direct een afkoelend effect, omdat de totale energietoevoer aan de aarde wordt verminderd. Onder CDR vallen de technologieën die CO₂ uit de atmosfeer halen en vervolgens opslaan, waardoor het broeikas-effect verminderd wordt. Hieronder komen eerst de SRM- en daarna de CDR-technologieën aan de orde. In de kaders aan het eind van dit hoofdstuk gaan we dieper in op de vormen van klimaatengineering die naar alle waarschijnlijkheid het effectiefst en haalbaarst zijn.

1.5.1 Solar Radiation Management

In de wetenschappelijke literatuur en in diverse beleidsrapporten worden verschillende vormen van SRM beschreven, die met name verschillen in de locatie van toepassing, bijvoorbeeld in de ruimte of op het aardoppervlak. Volgens klimaatwetenschappers zou een blokkering van ongeveer twee procent van het inkomende zonlicht een groot effect kunnen hebben; het zou de verdubbeling van de pre-industriële CO₂-concentratie kunnen compenseren (Lenton & Vaughan 2009). Hiervoor zou een aardoppervlak van ongeveer drie miljoen vierkante kilometer beschaduwd moeten worden. In deze paragraaf bespreken we de SRM-technologieën die het vaakst genoemd worden. Hierbij beperken we ons tot de opties die in wetenschappelijke publicaties zijn uitgewerkt.

Reflectie in de ruimte

Zonlicht weren voordat het de atmosfeer binnenkomt: dat is het principe achter SRM-technologieën die in de ruimte worden toegepast. Bijvoorbeeld door middel van ruimteschilden die het zonlicht reflecteren, of door middel van een 'parasol' van kleine (stof)deeltjes die het zonlicht tegenhouden.

Verschillende opties zijn beschreven. Bijvoorbeeld om 55 duizend reflecterende 'zonnezeilen' van honderd vierkante kilometer doorsnee in een baan om de aarde te brengen, met een gewicht van 110 ton per stuk (NAS 1992 in GAO 2011 en The Royal Society 2009). Of een ijzeren spiegel van 5,1 micrometer dikte en 3.600 vierkante kilometer doorsnee, met een gewicht van 420 miljoen ton

(McInnes 2002 in GAO 2011 en The Royal Society 2009). Of een zwerm van tien triljoen heel dunne schijfjes van zo'n zestig centimeter doorsnee. Deze zouden per miljoen tegelijk gelanceerd moeten worden, elke minuut een lading gedurende de komende dertig jaar (Angel 2006 in GAO 2011 en The Royal Society 2009). Het is niet verbazingwekkend dat deze opties vooralsnog als technisch onhaalbaar en te duur worden gekwalificeerd; ze zijn niet binnen korte tot middellange termijn te realiseren.

Stofdeeltjes in de stratosfeer (Stratospheric Aerosol Injection, SAI)

De injectie van aerosolen in de stratosfeer, de luchtlaag boven de troposfeer, is de meest besproken en onderzochte vorm van SRM. Het staat bekend onder de naam Stratospheric Aerosol Injection, in het Nederlands stratosferische aerosol-injectie (SAI). Het basisprincipe van SAI is relatief eenvoudig. Doordat aerosolen kleiner dan één micrometer zonlicht reflecteren en verstrooien, kan minder zonlicht het aardoppervlak bereiken (The Royal Society 2009; GAO 2011). Door middel van SAI wordt in feite een vulkaanuitbarsting nagebootst. Zie ook kader 1.

Wolken bleken (Marine Cloud Brightening, MCB)

In de lagere luchtlagen bevinden zich wolken die zonlicht tegenhouden. Door deze wolken boven zee witter te maken, reflecteren ze meer zonlicht. Door fijne zeewaterdeeltjes in deze wolken te brengen, vormen zich fijne druppeltjes en worden de wolken dichter en witter. Daarom heet deze technologie ook wel Marine Cloud Brightening (MCB) of kortweg *cloud whitening*. Deze druppeltjes weerkaatsen vervolgens meer zonlicht. Zie ook kader 2.

Verhoging reflectiviteit woestijn

Ook op leefniveau kan zonlicht gereflecteerd worden. Zo is er een voorstel gedaan om woestijnen te bedekken met wit folie, om op die manier te verhinderen dat zonlicht het woestijnooppervlak kan verwarmen. Een bedekking van twaalf biljoen vierkante meter (ongeveer twee procent van het aardoppervlak) zou voldoende zijn (Gaskell 2004 in GAO 2011). Hoewel de technologie eenvoudig ongedaan te maken is, kunnen de ecologische consequenties groot zijn, niet alleen voor de woestijnen zelf, maar ook voor bijvoorbeeld neerslagpatronen. De kosten worden geschat op enkele biljoenen dollar per jaar. Al met al maakt deze vorm van SRM weinig kans op daadwerkelijke uitwerking (The Royal Society 2009).

Wit schilderen van daken en wegen

Een tweede *low tech*-vorm van SRM is het wit schilderen van verharde oppervlaktes binnen de bebouwde omgeving. De effectiviteit hiervan is afhankelijk van de hoeveelheid beschikbaar verhard oppervlak. De schattingen hiervan variëren van 0,05 tot 2,3 procent van het landoppervlak en de effectiviteit van nihil tot een klein beetje. De kosten van het schilderen van de daken in een gebied ter grootte van één procent van het landoppervlak (10^{12} m²) worden

daarentegen geschat op zo'n driehonderd miljard dollar per jaar, waarmee dit volgens de The Royal Society een van de duurste en minst effectieve technologieën is (The Royal Society 2009). Lokaal kan deze vorm van SRM wel toegepast worden als adaptatiemaatregel, dus om de leefbaarheid te bevorderen, bijvoorbeeld in warme steden.

Verhoging reflectiviteit gewassen en grasland

Planten, grasland en andere vegetatie reflecteren een deel van het invallende zonlicht. Deze hoeveelheid zonlicht varieert sterk per plantensoort. Daarom is de mate van reflectie te beïnvloeden door sterk weerkaatsende vegetatie aan te planten. Op deze manier zou een regionaal significante koeling bereikt kunnen worden, tot één graad in Noord-Amerika en Centraal-Europa. De wetenschappelijke informatie over deze optie is echter nog zeer beperkt, en ook informatie over de kosten is volgens de rapporten niet beschikbaar.

1.5.2 Effecten van Solar Radiation Management

Het wetenschappelijk onderzoek naar Solar Radiation Management staat nog in de kinderschoenen en vindt vooral plaats door middel van computermodellering en -simulaties. Het meeste onderzoek vindt plaats naar Stratospheric Aerosol Injection (SAI), ook omdat er al veel onderzoeksgegevens beschikbaar zijn over vulkaanuitbarstingen.

Hoewel er nog veel onzekerheid bestaat over de effecten van SRM-technologieën, staat in elk geval vast dat ze bij toepassing direct effectief zijn. Het zonlicht wordt immers vanaf dat moment gereflecteerd, waardoor het op aarde onmiddellijk afkoelt. Volgens de modellen kan een weerkaatsend effect op zo'n twee procent van het aardoppervlak de gevolgen van een verdubbeling van de pre-industriële concentratie CO_2 (van 280 naar 560 ppm) in de atmosfeer compenseren. Als er echter niets veranderd aan de uitstoot van CO_2 , zal de hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer blijven toenemen, wat ook een verzurend effect heeft op de oceanen. SRM doet niets aan de CO_2 -concentratie in de atmosfeer, en zal dus ook geen invloed hebben op deze verzuring.

De toepassing van SRM betekent niet dat we terugkeren naar een eind-twintigste-eeuws klimaat, of dat de gevolgen van klimaatverandering volledig ongedaan gemaakt kunnen worden. De gevolgen van klimaatverandering zullen niet overal in gelijke mate gecompenseerd worden, omdat de effecten van SAI en het bleken van wolken (de belangrijkste SRM-opties) per regio anders zullen uitpakken (Ricke, Morgan & Allen 2010; Latham et al. 2012). Uit modelmatig onderzoek blijkt dat het niet mogelijk is om zowel de temperatuur als de hoeveelheid neerslag constant te houden. Dit betekent dat hoe meer SRM wordt toegepast en hoe koeler het wordt, hoe groter de neerslagreductie is en hoe droger het in bepaalde regio's zal worden (Bolassina, Ming & Ramaswamy 2011). Met name op de langere termijn, tegen 2070, zou dit regionale effect optreden. De uitbarsting van de vulkaan Pinatubo in 1991, die een

vergelijkbaar effect had als de toepassing van SAI zou hebben, leidde inderdaad tot een vermindering in neerslag (Robock 2008). Dit zou gevolgen kunnen hebben voor de regionale voedselproductie (ibid.).

Als de gevolgen van SRM per regio verschillen, zou SRM misschien ook per regio anders kunnen worden toegepast. Dat zal onderhandelingen over de toepassing van SRM niet vereenvoudigen (Ricke, Morgan & Allen 2010). Het is echter wel zo dat de afwijkingen in temperatuur en neerslag die optreden na toepassing van SRM, volgens de modellen nog altijd kleiner zijn dan de afwijkingen die optreden bij klimaatverandering zónder dat SRM en mitigatiemaatregelen worden toegepast (ibid.).

SRM kan nog andere nadelige effecten hebben. Zo leidt SAI door de toename van aerosolen in de stratosfeer waarschijnlijk tot enige afbraak van de ozonlaag, waardoor het herstel van de ozonlaag vertraagd wordt (Rasch et al. 2008). Ook kan uitspoeling van sulfaat enige vorm van zure regen veroorzaken. Deze hoeveelheid is echter heel beperkt en staat niet in verhouding tot de vervuiling van de atmosfeer als gevolg van industriële activiteiten.

1.5.3 Carbon Dioxide Removal

Een tweede manier om direct invloed uit te oefenen op het klimaatstelsel is Carbon Dioxide Removal: het uit de atmosfeer verwijderen en vervolgens opslaan van CO₂. De mate waarin de temperatuur zich aanpast, is afhankelijk van de grootschaligheid waarmee CDR wordt toegepast. Als op korte termijn grote hoeveelheden CO₂ worden afgevangen en voor langere tijd opgeslagen, heeft dit meer effect dan wanneer dit proces langzaam wordt opgeschaald.

Zoals in figuur 1.2 zichtbaar werd, verdwijnt CO₂ heel langzaam uit de atmosfeer. Het is niet waarschijnlijk dat CDR zo snel en effectief kan zijn dat het als 'noodkoeling' kan worden toegepast, zoals dat bij SRM wel het geval is.

De manier waarop CO₂ uit de atmosfeer wordt verwijderd en vervolgens vastgelegd, verschilt per technologie. Grofweg kan een onderscheid worden gemaakt in technologieën die CO₂ opslaan door middel van natuurlijke processen zoals bebossing, en technologieën die dit op een meer *high tech*-manier doen, zoals Direct Air Capture. Hoewel CO₂ niet het enige broeikasgas is, richt CDR zich louter op de verwijdering van CO₂. Technologieën om andere broeikasgassen uit de atmosfeer te verwijderen, zijn nog niet ontwikkeld (The Royal Society 2009).

IJzerbemesting van oceanen (Ocean Iron Fertilization, OIF)

De oceanen vormen een belangrijk onderdeel van de CO₂-kringloop en leggen grote hoeveelheden CO₂ vast in organisch materiaal. Dit proces functioneert optimaal in gebieden waar alle voedingsstoffen voor de groei van algen aanwezig zijn, zoals ijzer. De toevoeging hiervan zou de opname en vastlegging

van CO₂ voor langere tijd kunnen bevorderen. IJzerfertilisatie van oceanen is een van de meest besproken CDR-opties. Desalniettemin wordt de effectiviteit ervan betwijfeld, en zouden er nadelige effecten kunnen optreden. Zie ook kader 3, en het interview met oceanograaf Hein de Baar in hoofdstuk 3.

Bebossing

De grootschalige kap van (tropische) bossen is verantwoordelijk voor zo'n twintig procent van de CO₂-uitstoot. Door herbebossing en de grootschalige aanplant van nieuw bos kunnen grote hoeveelheden CO₂ worden vastgelegd. Dit vergt echter grote hoeveelheden land, wat kan conflicteren met de behoefte aan landbouwgrond en gevolgen kan hebben voor de biodiversiteit. Hoewel bebossing relatief eenvoudig en snel te realiseren is, verloopt de vastlegging van CO₂ door het trage groeiproces relatief langzaam (The Royal Society 2009). Zie ook kader 4.

Biochar

Als plantaardig materiaal (biomassa) groeit, slaat het CO₂ op. Bij het afsterven komt dit weer vrij. Als plantaardig materiaal in plaats daarvan verkoold wordt en vervolgens wordt begraven, zit de CO₂ voor langere tijd in deze houtskool opgeslagen. Deze methode is in technologisch opzicht relatief onprobleematisch, en heeft positieve neveneffecten op de bodemvruchtbaarheid. Voor de teelt van biomassa op deze schaal zijn echter grote hoeveelheden (landbouw) grond vereist. Ook kan de opslag invloed hebben op waterkwaliteit (The Royal Society 2009). Zie ook kader 5.

Bio-energie met CO₂-opslag (Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS)

De productie van biobrandstoffen uit biomassa is een CO₂-neutrale technologie en wordt daarom als een mitigatiestrategie gezien. De CO₂ die bij dit proces vrijkomt, kan ook worden opgevangen en vervolgens ondergronds worden opgeslagen. Dit proces heet Carbon Capture and Storage (CCS). In het geval dat de productie van bio-energie met CCS wordt gecombineerd, wordt het een CO₂-negatieve technologie en is het een vorm van klimaatengineering. Ook deze technologie is in technologisch opzicht haalbaar, maar vergt weer grote oppervlakten aan grond (The Royal Society 2009). De teelt van biomassa op de oceaan lijkt ook een mogelijkheid; ECN en het NIOZ doen hier momenteel onderzoek naar. Zie ook kader 6.

Versnelde verwerking van mineralen (enhanced weathering)

Verschillende mineralen verwerken onder invloed van natuurlijke processen. Bij deze verwerking nemen ze CO₂ op en vormen ze carbonaten of silicaten. Olivijn is een voorbeeld van zo'n gesteente. Het verweringsproces verloopt normaal gesproken erg langzaam, maar dit kan versneld worden. Dit kost echter energie, wat het effect gedeeltelijk weer teniet kan doen. Zie ook kader 7.

Direct Air Capture (DAC)

Bij Direct Air Capture wordt CO₂ direct uit de buitenlucht gefilterd en ondergronds opgeslagen. Dit is helaas niet zo eenvoudig als het klinkt. CO₂ is namelijk zeer sterk verdund in de lucht aanwezig, waardoor dit proces veel energie kost (The Royal Society 2009). De methode kent relatief weinig nadelen; er wordt niet ingegrepen in natuurlijke processen. In Nederland bestaat veel maatschappelijke weerstand tegen de ondergrondse opslag van CO₂ in bewoond gebied. De opslag kan echter op elke willekeurige locatie ter wereld plaatsvinden. Zie ook kader 8.

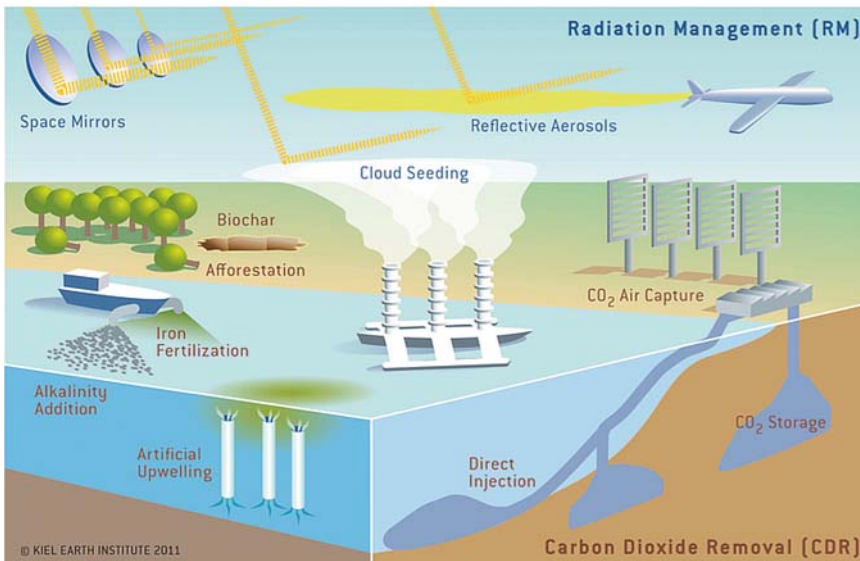
1.5.4 Effecten van Carbon Dioxide Removal

De technologieën die onder de noemer Carbon Dioxide Removal vallen, hebben allemaal tot doel CO₂ langdurig vast te leggen, om zo de concentratie aan CO₂ in de atmosfeer te verlagen. De opslag van CO₂ kan plaatsvinden in de diepzee, zoals bij de ijzerfertilisatie van oceanen, in mineraalvorm of onder de grond. De opslag van CO₂ onder de grond ligt voor de hand als CO₂ in pure vorm is ontstaan, hetzij door de filtering van CO₂ uit de lucht, hetzij bij de productie van bio-energie. Bij elke vorm van opslag moet er in ieder geval voor gezorgd worden dat die langdurig van aard is. Als het CO₂ na enkele tientallen decennia weer vrijkomt, zal de concentratie aan CO₂ in de atmosfeer weer toenemen, met een stijging van de temperatuur als gevolg.

De effecten van CDR zijn divers, omdat het om uiteenlopende technologieën gaat. Het voornaamste effect is dat op de biodiversiteit. In het geval van ijzerfertilisatie bestaat de mogelijkheid dat de toevoeging van ijzeroxide aan oceanen effect heeft op lokale ecosystemen.

Bebossing, biochar en BECCS leggen CO₂ vast door organisch materiaal te telen en dit vervolgens op verschillende manieren te verwerken. Het vergt een groot oppervlak aan land om dusdanig veel organisch materiaal te telen dat het daadwerkelijk effect heeft op de CO₂-concentratie. De hoeveel land kan ten koste gaan van het beschikbare areaal aan landbouwgrond en kan effect hebben op de hoeveelheid en prijs van voedsel. De discussie over de *land-based*-vormen van CDR kan zich in dit opzicht op dezelfde wijze ontwikkelen als de discussie over het gebruik van biomassa als brandstof. Ook kunnen zich monoculturen vormen, bijvoorbeeld bij de grootschalige aanplant van snelgroeïende bossen, wat ten koste kan gaan van de biodiversiteit.

Figuur 1.6 Vormen van klimaatengineering.



Bron: KEI (Kiel Earth Institute) (2011)

1.6 Overkoepelende kenmerken van klimaatengineeringstechnologieën

Bovenstaand overzicht laat de diversiteit zien aan technologieën die onder de noemer klimaatengineering worden geschaard. We roepen hier de definitie van The Royal Society even in herinnering: klimaatengineering is het grootschalig en intentioneel ingrijpen in het klimaatstelsel van de aarde om antropogene klimaatverandering tegen te gaan. Hieruit volgt dat grootschaligheid en intentionaliteit kenmerkend zijn voor alle vormen van klimaatengineering. Grootschalig wil zeggen dat deze technologieën de opwarming van de aarde in potentie kunnen beperken of tegengaan. Kleinschalige technologieën, die weliswaar lokaal een koelend effect kunnen hebben, vallen hiermee niet onder klimaatengineering. Zo vallen het wit schilderen van huizen voor een beter binnenklimaat, of maatregelen om het *urban heat island effect* tegen te gaan niet onder klimaatengineering, maar het op zeer grote schaal wit verven van wegen en daken wél. Hetzelfde geldt voor technologieën die het klimaatstelsel niet doelbewust beïnvloeden, zoals de grootschalige emissie van CO₂. Ook die worden dus niet tot klimaatengineering gerekend.

In onderstaande paragrafen gaan we dieper in op deze overkoepelende eigenschappen van klimaatengineeringstechnologieën en geven we een eerste reflectie op de morele betekenis ervan. In hoofdstuk 4 wordt dieper ingegaan op de morele betekenis van klimaatengineering.

Grootschaligheid

De schaalgrootte is de eerste eigenschap die inherent is aan alle vormen van klimaatengineering. Om daadwerkelijk effect te hebben en verdere opwarming tegen te gaan, moeten zowel SRM als CDR grootschalig worden toegepast. Als SRM lokaal wordt toegepast, denk aan het wit schilderen van daken of huizen in mediterrane landen, is het effect ook slechts lokaal. Om de aarde in zijn geheel te koelen, moet minimaal twee procent van het aardoppervlak extra reflecterend worden gemaakt (Lenton & Vaughan 2009). Hiervoor zullen grootschalige inspanningen nodig zijn; er wordt gesproken van een vloot van vijftienhonderd schepen of van duizenden vliegtuigen die sulfaat in de stratosfeer moeten brengen (zie kaders). Omdat sulfaat weer wordt afgebroken en de wolken weer verdwijnen, moet dit ook langdurig worden voortgezet.

Voor de verschillende vormen van CDR geldt in misschien nog grotere mate dan voor SRM dat de schaalgrootte bepalend is voor de effectiviteit. CDR werkt alleen als de CO_2 -concentratie in de atmosfeer substantieel daalt. Om deze daling te bewerkstelligen, moet (veel) meer CO_2 worden vastgelegd dan uitgestoten wordt. De hoeveelheid vast te leggen CO_2 is hiermee afhankelijk van de hoeveelheid CO_2 die wordt uitgestoten door de verbranding van fossiele brandstoffen en van het effect van eventuele emissiereducties. Als fors wordt ingezet op emissiereducties, kan CDR fungeren als een aanvullende maatregel om het CO_2 -gehalte in de atmosfeer sneller te laten dalen dan het geval is bij alleen CO_2 -reducties. Maar als emissiereducties uitblijven, zal alleen grootschalige CO_2 -opslag tot enig effect op het klimaat leiden. Zoals gezegd vergen technologieën als grootschalige bebossing, BECCS en de toepassing van biochar grote hoeveelheden land. Ook de winning en toepassing van olivijn zal grootschalig moeten plaatsvinden om enig effect te hebben.

Om klimaatengineering voor lange tijd te kunnen uitvoeren, zal enige vorm van institutionalisering noodzakelijk zijn. Intensieve samenwerking tussen landen of andere partners ligt daarbij voor de hand. De locaties en de daarbij behorende technische installaties moeten vastgelegd worden en voor lange tijd behouden worden. Ook moet de financiering langdurig beschikbaar zijn.

Grootschalige toepassing zal ook tot grootschalige gevolgen leiden. SRM heeft volgens de modellen invloed op het hele klimaatsysteem, en dat heeft negatieve consequenties. De risico's zullen naar alle waarschijnlijkheid niet evenredig verdeeld zijn. De mensen die de nadelen van klimaatengineering ondervinden, zijn niet degenen die de vruchten plukken van afkoeling. Grootschalige toepassing van SAI kan impact hebben op de Aziatische en Afrikaanse moesson en droogte veroorzaken, wat grote consequenties zou hebben voor de voedselvoorziening van zo'n twee miljard mensen in de desbetreffende regio's (Brovkin et al. 2011).

Bij CDR zijn deze risico's waarschijnlijk minder groot en urgent. Grootschalige bebossing, BECCS en de toepassing van biochar vragen echter wel om grootschalig landgebruik, wat een bedreiging kan vormen voor de voedselvoorziening van de armen en/of voor de biodiversiteit.

Tijdsbestek

Het aspect schaalgrootte komt terug in het tijdsbestek waarin klimaatengineeringstechnologieën worden toegepast. Als klimaatengineering wordt ingezet om antropogene klimaatverandering te beperken of tegen te gaan, zal deze toepassing van langdurige aard moeten zijn, enkele decennia tot zelfs eeuwen (The Royal Society 2009).

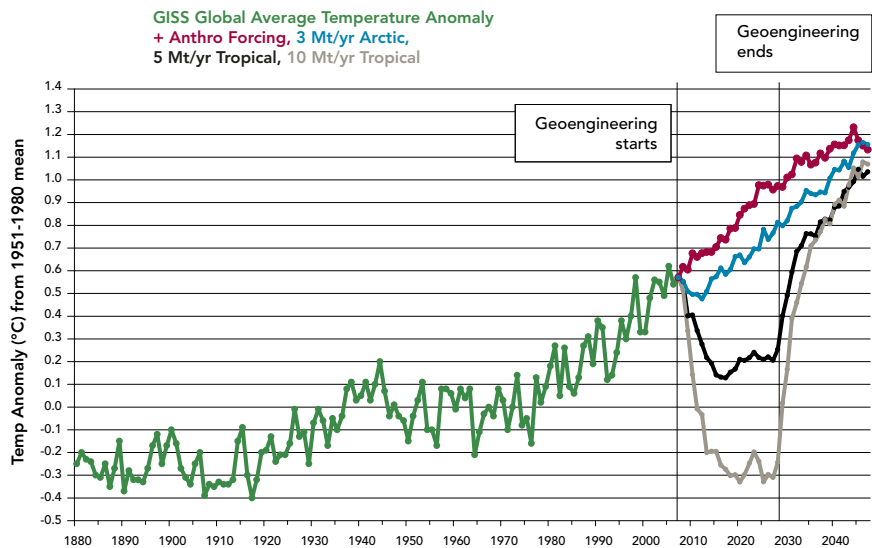
De toepassing van SRM zorgt door de reflectie van zonnestraling voor afkoeling, maar doet niets af aan de opbouw van CO₂ in de atmosfeer. Zolang er geen sprake is van een sterk mitigatiebeleid blijft deze concentratie onverminderd toenemen. Zelfs als de uitstoot van CO₂ tot nul wordt teruggebracht, zal het enige tijd duren voordat de concentratie CO₂ in de atmosfeer vermindert, het zogenoemde na-ijleffect. Als met SRM wordt begonnen moet dit langdurig – tientallen tot honderden jaren – worden volgehouden, totdat de concentratie aan CO₂ in de atmosfeer is afgenomen.

Reversibiliteit

Problemen ten aanzien van reversibiliteit hangen nauw samen met het bovenstaande tijdsaspect. Als met SRM wordt gestopt terwijl de uitstoot van CO₂ niet is verminderd, kan de aarde versneld opwarmen (het *rebound*-effect), zie figuur 1.7. Omdat het voor zowel de natuur als voor de mens lastiger is om zich aan te passen aan snelle, grote veranderingen dan aan een langzame opwarming, kan deze versnelde opwarming mogelijk grote effecten hebben (Matthews & Caldeira 2007). Dit wordt ook wel het terminatieprobleem genoemd.

Een gevolg van zowel het noodzakelijkerwijs grootschalige karakter als het langdurige tijdsbestek van SRM is dat de ingreep nauwelijks meer terug te draaien als er niet tegelijkertijd een forse emissiereductie wordt doorgevoerd.

Figuur 1.7 Het temperatureffect van de toepassing en beëindiging van klimaatengineering in verschillende scenario's.



Bron: Robock, Oman & Stenchikov (2008)

Rathenau Instituut

Voor CDR geldt dat als CO₂ wordt vastgelegd en opgeslagen zonder dat de uitstoot van CO₂ wordt verminderd, het proces van CO₂-opbouw weer verder gaat na het stopzetten van de CDR. Dit effect is veel kleiner dan bij SRM, omdat de CO₂ zich niet in de atmosfeer heeft opgehoopt (of in mindere mate, afhankelijk van de intensiteit waarmee CDR is toegepast). Hierdoor zijn er minder risico's verbonden aan CDR dan aan SRM.

Intentie

Een derde eigenschap van klimaatengineering die uit de definitie van The Royal Society naar voren komt, is de intentie waarmee de technologieën ingezet zouden worden. Klimaatengineering heeft als doel het tegengaan of beperken van de door menselijk handelen veroorzaakte klimaatverandering. Daarmee verschilt klimaatengineering van andere vormen van menselijk handelen die evengoed een grootschalig effect zouden kunnen hebben (zoals het testen van kernwapens), maar waarbij dit effect onbedoeld zou zijn.

Klimaatverandering is op zichzelf ook een 'grootschalig effect' als gevolg van menselijk handelen, maar ook dit handelen was niet intentioneel; niet bedoeld om de aarde op te warmen. Het grootschalig uitstoten van CO₂ is daarmee geen vorm van klimaatengineering.

De klimaatwetenschappers Keith & Dowlatabadi (1992) benadrukken dat klimaatengineering een bewuste manipulatie is van het klimaat, om het in een gewenste toestand te houden. Omdat het om een doelbewust en planmatig ingrijpen gaat, moet volgens ons verantwoordelijkheid worden genomen voor de gevolgen ervan.

Framing

De meeste klimaatengineers zien mitigatie als de beste en veiligste manier om klimaatverandering te voorkomen: mitigatie blijft plan A. Klimaatengineering is plan B: een middel om achter de hand te houden voor het geval dat de opwarming van de aarde tot zulke ernstige gevolgen leidt dat ingrijpen noodzakelijk is. De redenering dat we maar beter kunnen weten waar we mee bezig zijn als dat moment zich voordoet, rechtvaardigt volgens deze wetenschappers technologisch onderzoek. Daarnaast bestaat er een kleine groep wetenschappers die voorstander is van toepassing op korte termijn, om kantelpunten voor te zijn. Ook in dit geval wordt klimaatengineering als een noodoplossing gezien.

Met name SRM kan echter ook worden opgevat als een relatief goedkope en makkelijke manier om de nadelige effecten van klimaatverandering tegen te gaan. SRM kan daarmee in de plaats komen van dure mitigatiemaatregelen, die waarschijnlijk ingrijpen in bestaande productie- en consumptiepatronen. Sommige auteurs van conservatieve denktanks zien klimaatengineering als mogelijk alternatief voor mitigatie: 'Imagine no restrictions on fossil fuel usage and no global warming' (Los Alamos National Laboratory press release, in Lenstra, Doorn & Verheggen 2009). Dat is opmerkelijk, omdat deze denktanks eerder een sceptisch standpunt hebben ingenomen over klimaatverandering.

1.7 Ethische vragen

Bovenstaande kenmerken van klimaatengineering leiden tot ethische vragen en dilemma's met betrekking tot de aanvaardbaarheid van klimaatengineering.

Voorzorg

Gezien de grootschaligheid en het tijdsaspect van klimaatengineering, kan de toepassing ervan gepaard gaan met al dan niet voorziene negatieve effecten. Er zijn zoveel onzekerheden in het klimaatsysteem dat onderzoek in het lab, modelsimulaties of kleinschalig toegepast onderzoek onvoldoende zekerheid kunnen bieden over deze effecten. Alleen grootschalig onderzoek zal iets zeggen over de effectiviteit en risico's van klimaatengineering, maar staat wat effect betreft dan ook gelijk aan de toepassing ervan. Omdat we de gevolgen van de toepassing van klimaatengineering niet kunnen overzien, vereist deze toepassing voorzorg. Zowel in de milieu-ethiek als in het juridische debat speelt het voorzorgprincipe of -beginsel een belangrijke rol in de afweging van voorziene en niet-voorziene risico's bij de introductie van een nieuwe technologie.

Als er een risico bestaat op gevolgen die onaanvaardbaar zijn, kan worden besloten de technologie uit voorzorg niet toe te staan.

Ook de gevolgen van klimaatverandering zelf zijn echter met veel wetenschappelijke discussie en onzekerheden omgeven, en ook deze gevolgen kunnen grootschalig en negatief zijn. De huidige mitigatiemaatregelen zijn naar alle waarschijnlijkheid onvoldoende om grootschalige negatieve effecten van klimaatverandering te voorkomen. Omdat klimaatengineering probleemoplossend is, moet voorzorg worden afgezet tegen de gevolgen van 'niets' of 'te weinig' doen.

Moral hazard

Het in moreel opzicht meest problematische aspect van klimaatengineering is volgens sommigen het *moral hazard*-dilemma. De term *moral hazard* is afkomstig uit de verzekeringswereld en beschrijft de neiging van mensen om zich risicovoller te gedragen als ze zich eenmaal verzekerd hebben. Toegepast op klimaatengineering: wanneer dit als een serieuze optie wordt gepresenteerd, zou men kunnen denken dat er een makkelijke oplossing voorhanden is, waardoor inzet op CO₂-reductie niet meer nodig is.

De suggestie dat mitigatie vanuit moreel oogpunt beter is dan klimaatengineering wordt in hoofdstuk 4 nader besproken. Volgens milieu-ethicus Benjamin Hale (University of Colorado) is *moral hazard* een ambigu en vaag concept en moet het moreel problematische aspect verder worden doordacht (Hale 2012). Het optreden van *moral hazard* bij klimaatengineering wordt vooralsnog niet empirisch ondersteund. Uit een publieke dialoog die georganiseerd werd door de Natural Environment Research Council (NERC) bleek dat de deelnemers het belangrijk vonden om klimaatengineering te koppelen aan voortdurende mitigatie-inspanningen (Ipsos MORI 2010).

Mondiale rechtvaardigheid

Klimaatengineering heeft gewenste en ongewenste effecten, die zich niet gelijkmatig over de aardbol zullen verspreiden. Daarom spelen vragen over rechtvaardigheid een belangrijke rol in het debat. De toepassing van SRM op het noordelijk halfrond zal naar alle waarschijnlijkheid gevolgen hebben voor de voedselvoorziening op het zuidelijk halfrond. Daardoor kan klimaatengineering gevolgen hebben voor de kwetsbaarste mensen, en ook voor dieren en de overige niet-menselijke natuur. Is het rechtvaardig dat de armen zwaarder getroffen kunnen worden door de risico's van klimaatengineering? En welke betekenis heeft dit voor de internationale regulering en governance van klimaatengineering? Krijgen de armsten een stem in het onderhandelingsproces en worden ze gecompenseerd voor de geleden schade?

Klimaatengineers betogen dat deze groep ook het zwaarst getroffen zal worden door de gevolgen van klimaatverandering. Dit maakt bovenstaande

vragen echter niet minder relevant, zeker gezien de oorzaak van het klimaatprobleem. Het zijn immers de rijke westerse landen die grotendeels verantwoordelijk zijn voor de CO₂-uitstoot, zeker in historisch opzicht.

Rechtvaardigheid tussen generaties

Door het risico op het terminatie-effect heeft de toepassing van klimaatengineering niet alleen consequenties voor de huidige generatie, maar beïnvloeden de keuzes die nu of in de nabije toekomst worden gemaakt ook het handelen van toekomstige generaties. Deze toekomstige generaties erven niet alleen de mogelijk nadelige gevolgen van klimaatengineering. Ze worden tevens verantwoordelijk voor de technologie, de locatie, de financiering en de governance om deze technologie in stand te houden en eventueel te beschermen.

Dit gaat in tegen het principe van rechtvaardigheid tussen generaties. Volgens dit principe is het niet rechtvaardig als de huidige generatie zich bevoordeelt en tegelijkertijd de toekomstige generatie opzadelt met de lasten hiervan (Burns 2011). Een discussie over de morele aspecten van klimaatengineering zal moeten ingaan op het aspect van rechtvaardigheid tussen generaties. In hoofdstuk 5 wordt dieper ingegaan op het internationaal recht in relatie tot klimaatengineering en het principe van intergenerationele rechtvaardigheid hierbinnen.

Conclusie

Klimaatengineering komt als onderwerp op in de wetenschappelijke en publieke discussie. Het vertrouwen van klimaatwetenschappers in het vermogen van de internationale politiek om tot een klimaatverdrag te komen neemt af. Slechts een beperkt aantal landen heeft het huidige verdrag ondertekend, bovendien worden de vastgelegde doelstellingen niet door elk land gehaald. Nederland heeft zich tot nu toe aan zijn internationale verplichtingen gehouden, maar het zal nog een flinke inspanning vergen om de reductiedoelstellingen voor 2050 te halen.

Tegelijkertijd bestaat er onder klimaatwetenschappers een gevoel van urgentie over de opwarming van de aarde. De CO₂-concentratie in de atmosfeer stijgt en de kans is reëel dat de twee graden-grens aan het eind van deze eeuw overschreden wordt. Feedbackmechanismen zorgen hierbij voor een versterkend effect. Er wordt onderzoek gedaan naar grote feedbackmechanismen (tipping points of kantelpunten), die het klimaatsysteem in een andere staat kunnen brengen. Omdat CO₂ erg langzaam weer uit de atmosfeer verdwijnt, zal het eeuwenlang duren voordat de temperatuur weer wat zal dalen, zelfs als de CO₂-uitstoot nu onmiddellijk zou worden gestaakt.

Vanuit dit gevoel van urgentie werken klimaatengineers aan technologieën die de opwarming van de aarde kunnen tegengaan. De technologieën zijn te verdelen in twee clusters: Solar Radiation Management (SRM) en Carbon

Dioxide Removal (CDR). SRM-technologieën richten zich op het blokkeren van zonlicht, waardoor de aarde afkoelt. CDR-technologieën zijn bedoeld om CO₂ uit de atmosfeer te halen en vervolgens op te slaan.

Gezien de potentie, maar ook de nadelen en risico's van klimaatengineering, is een debat over de wenselijkheid van toepassing op zijn plaats. In landen als de Verenigde Staten, Groot-Brittannië en Duitsland begint dit debat op gang te komen en is de politiek geïnformeerd door middel van diverse beleidsrapporten en hoorzittingen. In Nederland is het politieke en maatschappelijke debat over klimaatengineering nog nauwelijks van de grond gekomen. Toch is het van belang dat het debat ook in Nederland gevoerd wordt. De discussie rondom klimaatengineering zal naar alle waarschijnlijkheid op de politieke agenda komen te staan bij het verschijnen van het Syntheserapport van het vijfde IPCC-rapport in 2014. In de samenvatting voor beleidsmakers van het rapport van werkgroep I (de natuurwetenschappelijke basis onder klimaatverandering) van het vijfde Assessment Rapport is al een paragraaf opgenomen over klimaatengineering. Het is daarom belangrijk dat Nederlandse politici en beleidsmakers zich kunnen voorbereiden op de discussie, en dat zij bekend zijn met de standpunten van de stakeholders in het klimaatdebat. Het Rathenau Instituut wil daar met dit rapport een bijdrage aan leveren.

De indeling van het rapport is als volgt. In hoofdstuk 2 analyseren we invloedrijke beleidsrapporten die sinds 2009 internationaal over het onderwerp verschenen zijn. We stellen onder meer vast vanuit welke motivatie deze rapporten zijn opgesteld en welke technologieën erin behandeld worden.

In hoofdstuk 3 staan de verschillende visies van de Nederlandse stakeholders in het klimaatdebat centraal. Het hoofdstuk sluit af met een serie interviews.

Hoofdstuk 4 gaat over de morele vragen en dilemma's die een rol spelen in het debat over klimaatengineering. Het sluit af met ethische richtlijnen voor beleid.

In hoofdstuk 5 brengen we in kaart welke internationale wet- en regelgeving momenteel van toepassing is op de verschillende vormen van klimaatengineering. We gaan na of de huidige verdragen deze grensoverschrijdende technologieën voldoende reguleren.

In hoofdstuk 6 gaan we dieper in op de governance van onderzoek naar en toepassing van klimaatengineering, zowel wat SRM- als CDR-technologieën betreft. We doen hiervoor enkele aanbevelingen.

Kader 1 Stratospheric Aerosol Injection (SAI)

SAI: schuilen onder een scherm van stof

Gaston Dorren

De aarde beschermen met een 'parasol' van kleine zwavel- of andere deeltjes, meer dan tien kilometer boven de grond: dat is de kern van stratosferische aerosolinjectie (SAI). En het lijkt te kunnen. Waarschijnlijk is er zelfs geen andere klimaatengineeringstechnologie die een even krachtig effect verenigt met realistische kosten en uitvoerbaarheid op korte termijn. Het lijkt mogelijk te zijn om met SAI zo veel zonnestralen terug de ruimte in te kaatsen dat de energie die het aardoppervlak bereikt, afneemt met 3,7 watt per vierkante meter (W/m^2) (Lenton & Vaughan 2009). Dat zou ruimschoots de netto toename van 1,6 W/m^2 compenseren die de mensheid in de loop van 250 jaar heeft veroorzaakt. Klimaatprobleem opgelost, dus? Verre van. Niet alleen dreigen we aan het einde van deze eeuw uit te komen op een toename van 7 W/m^2 , maar bovendien zijn aan SAI grote nadelen en risico's verbonden. Daarover zo dadelijk meer. Maar eerst: hoe werkt het? Er zijn diverse varianten in omloop, die op twee punten verschillen. Het ene is het materiaal waaruit de parasol bestaat. Meestal zijn dat sulfaten, waarschijnlijk omdat die van nature ook al in de stratosfeer belanden, namelijk bij zware vulkaanuitbarstingen; denk aan de Pinatubo in 1991. Maar ook titaniumdioxide en siliciumverbindingen zijn genoemd, evenals glanzende metaalfinters, nanodeeltjes aluminium en bariumtitanaat, kleine glanzende ballonnen en het nederigste van alle fijne materialen: stof. (Het spul dat stuift, niet textiel.)

Het andere aspect waarover verschillend wordt gedacht, is hoe deze materialen het best in de stratosfeer gebracht kunnen worden, wat weer gedeeltelijk van het gekozen materiaal afhangt. Speciaal hiervoor ingezette vliegtuigen of raketten zijn een optie, maar ook de uitlaatgassen van reguliere lijnvluchten zouden een verspreidingsmiddel kunnen zijn. Daarnaast zijn tien kilometer hoge schoorstenen en grote ballonnen genoemd.

Ongeacht de gekozen variant heeft SAI altijd ook nadelen. Om te beginnen is het niet een eenmalige operatie die 'patiënt aarde' geneest, maar een behandeling die even permanent is als de kwaal chronisch. Omdat het weerkaatsende materiaal na enkele maanden tot jaren uit de stratosfeer weglekt, moet het voortdurend aangevuld worden. Gebeurt dat niet, dan veroorzaken de broeikasgassen alsnog de klimaatverandering die zonder SAI zou hebben plaatsgevonden, maar dan in korte tijd. De temperatuur stijgt dan dus sneller en aanpassing is nog

moeilijker, voor mens, plant en dier. Zo'n permanente behandeling is overigens niet ondenkbaar: de kosten liggen naar schatting in de orde van tien miljard dollar per jaar (McClellan in New Scientist 2012c). Dat is welbeschouwd zo goedkoop, dat sommige landen het gemakkelijk in hun eentje zouden kunnen doen.

Een ander en groter nadeel van SAI is dat het niet alle effecten van klimaatverandering aanpakt. Het koelt de aarde, maar de verzuring van de oceanen gaat gewoon door; dat geldt voor alle vormen van Solar Radiation Management, waar SAI er een van is. Die verzuring is een gevolg van de kooldioxidetoeename in de atmosfeer, iets wat SAI ongemoeid laat. Het probleem treft in eerste instantie allerlei kleine diersoorten in zee, maar die spelen wel een belangrijke rol onder in de voedselketen. Ook koraal lijdt onder de verzuring.

Een derde groot nadeel is dat SAI de zeespiegelstijging niet tot staan brengt. De deeltjesparasol is veel dikker en dus effectiever in tropische streken dan bij de polen, zodat hij het afsmelten van de ijskappen nauwelijks afremt. Juist die dooi is de voornaamste oorzaak van de stijgende zeespiegel (New Scientist 2012c).

Naast voorspelbare nadelen brengt SAI belangrijke onzekerheden met zich mee. Al naargelang uit welk materiaal de parasol bestaat, kan hij de – thans herstellende – ozonlaag opnieuw beschadigen. En als sulfaten in grote hoeveelheden uit de stratosfeer afdalen naar de troposfeer, dragen ze daar bij aan zure regen. Maar vermoedelijk is dat effect te zwak om milieuschade aan te richten (Kravitz 2009).

De allerbelangrijkste onzekerheid zit hem in de regionaal sterk uiteenlopende effecten die SAI zal hebben. SAI kan niet tegelijkertijd koelen en de hoeveelheid neerslag gelijk houden. Dit betekent dat SAI gevolgen kan hebben voor de hoeveelheid regen in sommige gebieden. Denk daarbij aan eventualiteiten als het stilvallen van de moesson in Zuid-Azië of aan droogte in regenwoudgebieden. Het is, zeker op dit moment maar mogelijk nog lange tijd, onmogelijk om zulke regionale effecten betrouwbaar te voorspellen. Dat maakt SAI dus tot een grote gok. Mocht het wél mogelijk worden om de effecten vooraf nauwkeurig te berekenen, dan zullen landen die schade dreigen te ondervinden zich er zeker tegen verzetten. Wat aanvankelijk een gok was, zal dan dus een politieke twistappel worden.

Gezien het feit dat SAI relatief betaalbaar is, zouden landen die er baat van verwachten, ook wel eens op eigen houtje zo'n 'parasol' kunnen gaan uitklappen. SAI kon op termijn wel eens voor flinke politieke spanningen gaan zorgen.

Maar dat is op termijn. Voorlopig doet het enige onderzoeksproject dat bescheiden veldexperimenten zou behelzen, SPICE in Groot-Brittannië, louter laboratoriumproeven.

Kader 2 Wolken bleken (Marine Cloud Brightening, MCB)

Wolken bleken: een wit jasje tegen de zon

Gaston Dorren

Stenen huizen in warme gebieden zijn vaak wit, en ook de koloniale tropenoutfit was licht van kleur. Goed bekeken, want lichtgekleurde oppervlakken weerkaatsen meer invallende straling dan donkere, zodat het in zulke huizen en onder zulke kleding koeler blijft. Datzelfde principe werkt ook in het groot: wanneer zonlicht de aarde bereikt op een lichtgekleurde plek, zoals een ijskap of een wolkendek, kaatst een groter deel van de stralingsenergie terug de ruimte in. Door een groter deel van de aarde een lichtere kleur te geven, kunnen we dus onze planeet wat afkoelen.

Er zijn tal van manieren om dat te doen, maar de krachtigste variant is het bleken van laaghangende bewolking boven zee, *stratocumulus* geheten. Die komt veel voor: op elk willekeurig ogenblik gaat een kwart tot een derde van de oceanen schuil onder dit soort wolken. Hun weerkaatsingsvermogen (oftewel *albedo*) varieert aanzienlijk, van dertig tot zeventig procent. Naarmate ze meer waterdruppels bevatten, zijn ze witter en weerkaatsen ze meer zonnestraling.

Technisch lijkt het mogelijk – hoewel niet gemakkelijk – om wolken te bleken. De kleine waterdruppels waar alle wolken uit bestaan, vormen zich rondom zogeheten condensatiekernen, minieme stofdeeltjes waar de watermoleculen zich aan hechten. Maar anders dan boven land, waar de lucht vol stof en vuil zit, zijn condensatiekernen boven zee relatief schaars. Komen er meer van dit soort deeltjes in de lucht, dan vormen zich meer (en kleinere) druppels, waardoor de wolk dichter en witter wordt én langer in stand blijft: dubbele ‘albedowinst’. Een voor de hand liggende manier om de benodigde deeltjes te vormen is het omhoog sproeien van zeewater, waardoor zeezoutdeeltjes in de lucht worden gebracht.

Wolken bleken klinkt misschien marginaal, maar is dat allesbehalve. Diverse wetenschappers, onder wie John Latham en Stephen Salter, hebben plannen gemaakt die volgens hun berekeningen de aarde even effectief koelen als het injecteren van zwavel in de stratosfeer: beide technologieën zouden de energie die het aardoppervlak bereikt, kunnen verminderen met 3,7 watt per vierkante meter. Dat zou genoeg zijn om een verdubbeling van het CO₂-gehalte in de atmosfeer (ten opzichte van de pre-industriële situatie) te compenseren (Latham et al. 2008). Andere berekeningen komen echter lager uit (Lenton & Vaughan

2009). In dit plan zou er een vloot van vijftienhonderd onbemande sproeisepen moeten rondvaren, aangedreven door windenergie, al zijn er ook andere manieren om hetzelfde doel te bereiken. Ook over de locatie is nagedacht: de wateren ten westen van Californië, Peru en delen van Afrika lijken het meest geschikt (Latham et al. 2012). Vergeleken met andere klimaatengineeringstechnologieën heeft het bleken van wolken diverse aantrekkelijke eigenschappen. Zo is het technisch niet al te ingewikkeld, al is het wel van groot belang dat het sproeisiel uit deeltjes van de juiste grootte bestaat (ongeveer één micrometer), want grotere vallen terug in zee, terwijl kleinere minder effectief zijn. Verder hoeft het idee geen astronomische bedragen te kosten: één à twee miljoen pond per schip (Salter 2008). Er zijn geen agressievere chemische stoffen mee gemoeid dan het zout dat in zeewater zit, en de ozonlaag loopt geen enkel risico. Een voordeel is ook dat de koeling regionaal optreedt, niet mondiaal. Het is daardoor in principe mogelijk om maatwerk te leveren. Het is bijvoorbeeld denkbaar om de polen extra te behandelen; de ijskappen dreigen immers af te smelten, en juist in die gebieden zet Stratospheric Aerosol Injection (SAI) weinig zoden aan de dijk.

Sommige nadelen van SAI gelden ook voor het bleken van wolken: de behandeling moet permanent doorgaan, de zeeën blijven verzuren en - het allerbelangrijkste - er is een risico dat het klimaat in sommige regio's juist ontwricht raakt.

Op twee punten scoort SAI beter dan wolken bleken: er is meer kennis over en het is effectiever op grote schaal in te zetten (Lenton & Vaughan 2009). Het eerste komt vooral doordat grote vulkaanuitbarstingen evenzovele natuurlijke experimenten zijn. Het mechanisme van wolken bleken is alleen op papier en in het laboratorium onderzocht, al is het uit observaties wel degelijk bekend dat wolken witter kunnen worden als er meer stofdeeltjes aanwezig zijn (denk bijvoorbeeld aan de zogenoemde *shiptracks*). Bij gebrek aan praktijkproeven lopen de voorspellingen nog ver uiteen. Een Noorse wetenschapper, Kari Alterskjær, meent bijvoorbeeld dat er zeventig keer zo veel sproeisiel nodig is voor het gewenste effect als Salter heeft berekend (Black 2011). Wolken bleken lijkt een van de meer realistische klimaatengineeringstechnologieën, maar er zijn nog heel wat hobbels te nemen voordat het op een verantwoorde manier te verwezenlijken is.

Kader 3 IJzerbemesting van oceanen

IJzerbemesting: staalpillen voor de koolzuurvreters

Gaston Dorren

‘Geef me een halve tanker vol ijzer en ik geef je een nieuwe ijstijd.’ Deze uitspraak van de oceanograaf John Martin (1935-1993) ligt ten grondslag aan ijzerbemesting als klimaatengineeringstechnologie. Welk mechanisme zit er echt achter zijn bewering?

Het begint ermee dat sommige delen van de oceaan, hoewel rijk aan voedingsstoffen, toch arm zijn aan plankton vergeleken met andere delen. De oorzaak, zo vermoedde Martin althans, is ijzergebrek. HNLC-gebieden worden ze genoemd: *high nutrient, low chlorophyll*. Voeg ijzer toe, in de vorm van minuscule deeltjes, en er zal meer plankton ontstaan. En omdat niet-dierlijk plankton flinke hoeveelheden van het broeikasgas CO₂ opneemt, zo redeneerde hij, zou zo’n planktontoename het klimaat flink afkoelen. Kortom: verhelp het ijzertekort en het klimaatprobleem is opgelost. De grootste uitdaging is nog om het niet te overdrijven, want op een ijstijd zit niemand te wachten.

Weliswaar klopt Martins theorie en verklaart ijzertekort inderdaad de planktonarmoede in ruwweg een derde deel van de oceanen. En net zoals staalpillen tegen bloedarmoede maar heel weinig ijzer hoeven te bevatten, zo is ook de zee al met een kleine hoeveelheid geholpen. Maar om CO₂ af te vangen is Martins ‘halve tanker vol ijzer’ toch veel minder effectief dan zijn beroemd geworden oneliner wil doen geloven. Daar komt nog bij dat de methode niet zonder risico’s is.

Wat de oceanograaf lijkt te hebben overschat, is hoe lang de door plankton opgenomen CO₂ opgeborgen blijft. Uit de voedselcyclus waar deze organismen deel van uitmaken, komt na korte tijd ook weer veel CO₂ vrij. Plankton is dan ook onder normale omstandigheden nauwelijks een koolstofopslag (*carbon sink*), maar vrijwel alleen een ‘doorvoerleiding’. De invloed op het klimaat is derhalve gering.

Dat wil zeggen: tenzij het lukt om een veel groter deel van het plankton dan normaal voor lange tijd uit het ecosysteem te verwijderen, met koolstof en al. En dat zou wel eens mogelijk kunnen zijn door vooral te mikken op één bepaalde groep planktonsoorten, de kiezelwieren (oftewel diatomeeën). Wordt plankton wel eens als ‘het gras van de oceanen’ aangeduid, kiezelwieren zijn eerder te vergelijken met distels, om een beeldspraak van de Indiase bioloog Victor Smetacek te lenen (New Scientist 2012b). Het gevolg is dat vrij veel kiezelwieren niet worden opgegeten, maar van ouderdom sterven en vervolgens zinken. Aangezien er in zee nauwelijks verticale stroming is, duurt het vele

eeuwen voordat de CO₂ die in de kiezelwieren is vastgelegd, weer in de atmosfeer belandt.

Het kán dus wel, CO₂ aan de atmosfeer onttrekken door de zee met ijzer te bemesten. Maar voor een ijstijd hoeven we niet bang te zijn, want de koolzuurvreter zijn al met al minder efficiënt dan Martin dacht: als plankton een tiende van de jaarlijkse menselijke CO₂-uitstoot zou opslurpen en wegbergen, is het maximum waarschijnlijk wel bereikt (New Scientist 2012b). 'Te weinig om dé oplossing te zijn, maar te veel om te negeren', om nogmaals Smetacek te citeren. Wat het idee wel extra aantrekkelijk maakt, zijn de lage kosten. Want al is er meer nodig dan Martins halve tanker, de hoeveelheden zijn te overzien en ijzer is niet duur.

Maar ijzerbemesting is wel een ruwe ingreep in een ecosysteem, en het voornaamste bezwaar is dan ook dat zo iets allerlei onvoorziene gevolgen kan hebben. Die kunnen positief zijn: het is bijvoorbeeld denkbaar dat een toename van kiezelwieren goed is voor de walvisstand (New Scientist 2012b). Maar ongunstige of zelfs dramatische gevolgen zijn bepaald niet uit te sluiten. Greenpeace (Allsopp, Santillo & Johnston 2007) heeft een aantal denkbare scenario's geschetst, waaronder de volgende.

Behalve ijzer verbruiken de 'gekweekte' kiezelwieren ook fosfaten, sulfaten en andere stoffen. Onder natuurlijke omstandigheden zouden die door zeestromingen zijn meegevoerd naar elders. Daar, stroomafwaarts, kan nu schaarste aan deze voedingsstoffen ontstaan. Dat zal de productiviteit van de lokale ecosystemen verminderen, iets waar ook de visserij onder zal lijden. Het is op termijn denkbaar dat de genoemde voedingsstoffen zelfs schaars worden in het met ijzer bemeste gebied zelf. In dat geval zou deze technologie dus maar een beperkte periode werken. Een ander scenario is dat ook de planktonsoorten die kiezelwieren eten geleidelijk toenemen en zo het effect van de bemesting tenietdoen. Verder kan ijzerbemesting leiden tot schadelijke algengroei of tot het vrijkomen van lachgas, een krachtig broeikasgas.

Hoe waarschijnlijk deze en andere scenario's zijn, is moeilijk te zeggen. Tot nu toe is er, sinds 1995, alleen op middelgrote schaal met ijzerbemesting geëxperimenteerd. (Een lijst van experimenten, met doorverwijzingen, is te vinden op Wikipedia, <http://goo.gl/VUoc6>.) Doorgaans is dat met wetenschappelijk zorgvuldigheid gebeurd, maar in één geruchtmakend casus voor de Canadese kust lijkt dat allerm minst het geval te zijn geweest (zie kader in hoofdstuk 5). De onderzoeksresultaten tot nu toe zijn bemoedigend genoeg om door te gaan. De zorgen van Greenpeace zijn te beschouwen als evenzovele aandachtspunten voor toekomstige experimenten, zeker als die steeds grootschaliger worden.

Kader 4 Bebossing

Bomen planten

Gaston Dorren

Bebossing is waarschijnlijk de allerbekendste klimaatengineerstechnologie. Al in 1990 richtten de toenmalige Samenwerkende Elektriciteitsproducenten Stichting Face op (Forests Absorbing Carbon Dioxide), die in de jaren daarna duizenden hectares bos plantte, vooral in de tropen. Bomen planten is, zeker in warme gebieden, een goedkope manier om CO₂ uit de atmosfeer te halen, die onder ideale omstandigheden ook nog andere positieve effecten heeft: de bomen kunnen akkers vruchtbaarder maken en beschaduwten, en ze leveren timmerhout.

Maar nadelen en risico's zijn er ook. Het voornaamste nadeel is dat bebossing, zeker de grootschalige variant, veel land vraagt: als een hectare bos per jaar tien ton CO₂ zou opnemen – en dat is een te optimistische aanname – zou vier keer de oppervlakte van Australië nodig zijn om alle menselijke CO₂-uitstoot te compenseren. Bovendien is bruikbaar land vrijwel overal een schaars goed, zodat grootschalige bosaanplant vaak de bestaansbasis van arme plattelanders bedreigt. Daarnaast zijn monoculturen een aanslag op de biodiversiteit. Ook zijn bossen kwetsbaar voor brandstichting en (illegale) brandhoutwinning. In beide gevallen gaat de koolstofopslag verloren.

Hoeveel bosaanplant precies bijdraagt aan bestrijding van klimaatverandering, is sterk afhankelijk van de omstandigheden. De CO₂-vastlegging hangt af van het klimaat, waarbij warmere klimaten (mits voldoende vochtig) meer groei en vastlegging mogelijk maken. Daarnaast dragen bossen bij aan lage bewolking, die zonlicht terugkaatst en daarmee de aarde koelt.

Kader 5 Biochar

Biochar: houtskool als opslag

Gaston Dorren

Wanneer agrarisch afval en ander organisch materiaal wordt verbrand of geleidelijk vergaat, komt er CO₂ of methaan (CH₄) vrij. Dat is te voorkomen door er een soort houtskool van te maken en dat vervolgens in de bodem op te slaan, dicht onder het maaiveld. Daarmee is niet alleen de koolstof voor langere tijd opgeborgen, maar bovendien nemen de bodemkwaliteit en -vruchtbaarheid toe. Hoe lang dit houtskool precies stabiel blijft in de bodem, is overigens enigszins omstreden en in ieder geval afhankelijk van de precieze samenstelling (Milne & Field 2012). Houtskool produceren is van alle klimaatengineeringstechnologieën waarschijnlijk het minst omstreden. Het is eenvoudig, goedkoop en heeft geen grote nadelen. Het enige wat valt aan te merken op deze zogeheten *biochar* (Engels, dus de uitspraak luidt 'baio-tsjar'), is zijn beperkte potentieel. Een realistische inschatting van de hoeveelheid CO₂ die hiermee valt te compenseren, lijkt vijf procent van de jaarlijkse mondiale CO₂-uitstoot uit menselijke bronnen te zijn, al circuleren er ook wel optimistischer schattingen (J. Jackson 2011). De feitelijke bijdrage zal mede van de kosten afhangen, en die lopen sterk uiteen afhankelijk van waar de grondstof vandaan komt: rioolzuiveringsinstallaties betalen goed geld om van hun organisch afval af te komen, terwijl speciaal geteelde gewassen juist vrij prijzig zijn.

Kader 6 BECCS

BECCS: bio-energie met CCS

Gaston Dorren

Deze technologie, afgekort als BECCS, is een combinatie van twee technologieën die elk ook afzonderlijk worden toegepast. De ene, energiewinning uit biomassa, is geen klimaatengineeringstechnologie, maar een vorm van duurzame energiewinning – in Nederland zelfs de meest gebruikte. Hij geldt als CO₂-neutraal omdat de biomassa tijdens de groei evenveel CO₂ heeft opgenomen als er bij verbranding vrijkomt. Dat klopt weliswaar niet helemaal, omdat er bij productie en verwerking enige energie wordt verbruikt, maar al met al is de CO₂-uitstoot wel een stuk lager dan bij fossiele brandstoffen.

Het tweede deel van deze combinatie is CCS: het afvangen en opslaan van CO₂. CCS kan worden toegepast op installaties die fossiele brandstoffen verstoren, maar werkt net zo goed met biomassa of een mengsel van beide. De charme van BECCS is erin gelegen dat de CO₂-uitstoot negatief is: de biomassa heeft in zijn groei CO₂ opgenomen, en de CCS zorgt ervoor dat die CO₂ grotendeels definitief wordt weggeborgen.

Beide technologieën hebben hun nadelen en risico's, en de combinatie verenigt die allemaal in zich. Zo is het bij biomassa belangrijk én moeilijk te garanderen dat de productie niet ten koste gaat van voedselgewassen en natuurgebieden. Een punt van zorg bij CCS is het risico dat het weggeborgen gas naar de oppervlakte lekt; geologen zijn daar niet al te bezorgd over, maar omwonenden een stuk meer. Ook is het denkbaar dat de afgevangen CO₂ gebruikt wordt als hulpmiddel bij de oliewinning. Wat de financiële kant betreft is geschat dat bij een prijs van vijftig dollar per ton CO₂ zo'n tien procent van de mondiale (mense-lijke) uitstoot met deze technologie valt te compenseren (IEAGHG 2011).

Kader 7 Versnelde verwerking van olivijn

Olivijn: versnelde geologie

Gaston Dorren

Eén kilo van het mineraal olivijn haalt bij verwerking 1,2 kilo CO_2 uit de lucht: het bovenste laagje van het gesteente reageert met CO_2 in de lucht tot magnesiumcarbonaat en silica. Een halve kilo steenkool brengt bij verbranding juist zo'n 1,2 kilo CO_2 in de lucht. Conclusie: laat voor elke kilo verstookte steenkool twee kilo olivijn verwerken en de klimaat-schade is voorkomen. Een soortgelijk sommetje is te maken voor olie en gas.

Kan olivijn werkelijk helpen om het klimaatprobleem op te lossen, of in ieder geval voor zo lang als we nog op fossiele brandstoffen vertrouwen? Theoretisch zeker. De verwerking van olivijn en andere gesteenten is het belangrijkste mechanisme dat het CO_2 -gehalte van onze atmosfeer vele miljoenen jaren binnen een zekere bandbreedte hield, voordat de mens fossiele brandstoffen begon te verstoken.

In de praktijk zijn er wel wat hobbels te nemen. Ten eerste zou er erg veel olivijn gewonnen moeten worden – in dezelfde orde van grootte als de hoeveelheid olie, kolen en gas, dat wil zeggen zo'n 25 miljard ton (25 gigaton) per jaar. Omdat olivijn enkele malen zwaarder is dan die olie en kolen, zou de hoeveelheid uitgedrukt in kubieke meters enkele malen geringer zijn. En ten tweede moet het verweringsproces versneld worden, want het geologische tempo waarmee dat normaal gesproken verloopt zet uit klimaatoogpunt geen zoden aan de dijk (Schuiling & Krijgsman 2006).

In de aarde zit olivijn genoeg, dat is het probleem niet. Dat er enorme hoeveelheden nodig zijn, maakt het idee evenmin onhaalbaar, want de mijnbouwsector is gewend om te denken (én te doen) in gigatonnen. Bovendien, olivijn hoeft natuurlijk niet meteen of per se de hele CO_2 -uitstoot weg te werken – klein beginnen mag ook. De uitdaging zit vooral in de laatste stap, de versnelde verwerking. Om dat proces 'op te voeren' moet het gesteente in ieder geval vermalen worden. Hoe fijner de korrels zijn, des te sneller gaat de verwerking, maar ook: des te meer geld en energie kost het malen. Het zoeken is dus naar een methode die financieel aantrekkelijk is en niet te veel nieuwe CO_2 oplevert.

Er circuleren verschillende ideeën, en wereldwijd houden zo'n twintig onderzoeksgroepen zich met het onderwerp bezig. De in Nederland bekende geochemicus en olivijnpleitbezorger Olaf Schuiling (zie interview) stelt dat het gesteente redelijk grof gemalen kan worden en dan uitgespreid zou moeten worden over twee miljoen vierkante kilometer land, een oppervlakte ter grootte van Saoedi-Arabië. Hij komt uit op de

schappelijke prijs van tien tot vijftien euro per ton CO₂. Het restproduct zou bruikbaar zijn als meststof.

Een andere mogelijkheid is om olivijn op zee uit te strooien. Dat heeft meerdere voordelen: niet alleen is er geen landoppervlak nodig, maar bovendien bestrijdt het basische mineraal in één moeite door de verzuring van de zeeën, die een gevolg is van het toegenomen CO₂-gehalte van de atmosfeer. Een groot nadeel is wel dat het olivijn hiervoor bijzonder fijn gemalen moet worden, omdat de korrels anders zinken.

Geschat wordt dat dat zo veel energie kost dat rond de dertig procent van de CO₂-winst weer verloren gaat (Köhler et al. 2013). Daarnaast zal het olivijn, dat ijzer bevat, op sommige plaatsen de groei van kiezelwieren bevorderen, hetgeen voordelen én risico's met zich meebrengt (zie kader 3 over ijzerbemesting).

Een volgende mogelijkheid is om het olivijn niet al te fijn te malen, maar de verwerking te laten plaatsvinden onder hogere temperaturen of hogere druk, waardoor het proces veel sneller verloopt. Chemisch gezien levert deze methode dezelfde eindproducten op als de twee vorige, namelijk magnesiumcarbonaat en silica, maar in dit geval hebben ze een grotere economische waarde: ze zijn niet uitgespreid over een groot oppervlak of zelfs opgelost in zeewater, maar gelokaliseerd in één installatie, zodat ze gemakkelijk verpakt en verkocht kunnen worden. Dat is vooral zo belangrijk omdat het verwijderen van CO₂ op dit moment nog nauwelijks geld oplevert. De concentratie van het proces op één plek heeft nog een tweede voordeel: het maakt het gemakkelijker om de energie te benutten die vrijkomt bij de verwerking van olivijn. Een Nederlands bedrijf dat zich met deze optie bezighoudt is Innovation Concepts – zie het interview met Pol Knops.

Een laatste mogelijkheid is om fijngemalen olivijn te vermengen met andere materialen: dakbedekking, strooizout, vulzand, enzovoort.

De gemeente Rotterdam heeft deze mogelijkheden laten onderzoeken. Uit het rapport is op te maken dat sommige van deze ideeën praktisch en financieel haalbaar zijn, maar de effecten bescheiden. Voorbeeld: als alle Nederlandse gemeenten olivijn zouden mengen door het zand waarin ze bomen planten, compenseert dat de uitstoot van zo'n 110 duizend ton CO₂ per jaar – ongeveer 0,05 procent van de totale Nederlandse CO₂-uitstoot. Door andere toepassingen zou dit aandeel nog eens 3,5 keer zo groot kunnen worden, dus tot zo'n 0,18 procent van de Nederlandse uitstoot (berekend op basis van Hamer & Vink 2012). Dit gaat dus alleen over gemeenten; andere partijen kunnen het getal verder opvoeren. Ook particulieren kunnen dat doen: het bedrijf greenSand verkoopt producten als tuinaarde en potgrond met bijgemengde olivijn.

Kader 8 Direct Air Capture

DAC: dure air-conditioning

Gaston Dorren

Hoe vind je 385 kleurloze, onzichtbare naalden in een hooiberg van een miljoen sprietjes? Dat is de vraag waarop een antwoord nodig is als we een deel van de CO_2 willen verwijderen uit de dampkring die ons omringt. Ondoenlijk is het niet. Net zoals je een speld in een hooiberg kunt vinden als je maar genoeg tijd en geduld hebt, zo kun je CO_2 uit de lucht halen als je maar voldoende apparatuur en geduld hebt.

Aan zulke apparatuur wordt volop gewerkt. Zoals vaak in het beginstadium van een nieuwe ontwikkeling, lopen de technologieën nog enigszins uiteen. Wat ze gemeen hebben is dat lucht langs een vaste stof of vloeistof wordt gevoerd. Bij de vaste stof hechten de gasdeeltjes zich aan het oppervlak (adsorptie, met d), terwijl de vloeistof de gasdeeltjes in zich opneemt (absorptie, met b). Na verdere verwerking is het eindproduct pure CO_2 .

DAC (*direct air capture*) is volgens de meeste berekeningen niet goedkoop: schattingen variëren van 20 tot 450 euro per ton verwijderde CO_2 , en de hogere cijfers komen uit meer gerenommeerde bronnen (Ranjana & Herzoga 2010). De kosten zijn vooral zo hoog doordat de lucht om ons heen weliswaar te veel, maar toch nog steeds erg weinig CO_2 bevat; vandaar de vergelijking met die hooiberg. Toch zijn er ook vele plaatsen in de wereld – alleen al 50 duizend elektriciteitscentrales met kolenstook – waar de concentratie meer dan honderd keer zo hoog is. Het is zeker tien keer zo goedkoop om dáár CO_2 af te vangen als op een willekeurige locatie. Als de atmosfeer een hooiberg is met een paar spelden, dan is zo'n centrale een speldenfabriek.

Een ander nadeel van DAC, naast de prijs, is dat het veel energie kost. Al naargelang een aantal technische omstandigheden is het netto-effect van DAC tussen de dertig en zeventig procent geringer dan het bruto-effect, doordat er energie opgewekt moet worden om het proces te laten draaien (Socolow 2012). Natuurlijk kan de benodigde energie ook opgewekt worden met duurzamere technologieën, zoals zonnepanelen. Maar in dat geval kunnen de zonnepanelen beter een vervuillende centrale vervangen, zonder de omslachtige omweg van DAC. Daar komt bij dat DAC ook nog aardig wat water kost: afhankelijk van de gehanteerde methode kan dit oplopen tot zesduizend liter water per ton CO_2 , volgens Britse onderzoekers (New Scientist 2012a). Diezelfde onderzoekers berekenden tevens wat erbij zou komen kijken om elk jaar de CO_2 -uitstoot van menselijke makelij, zo'n dertig gigaton, in zijn geheel af te vangen. Hun conclusie: die sector zou in de orde van

duizend keer zo groot moeten zijn als welke andere economische sector ook. Vage cijfers, maar geen hoopgevende.

Er zit bovendien een adder onder het gras. De afgevangen CO₂ kan gebruikt worden om uitgeputte olievelden nieuw leven in te blazen: door er CO₂ in te pompen wordt onwinbare olie alsnog winbaar. Voor de DAC-bedrijven is dat aantrekkelijk, want ze kunnen alleen 'leven van de lucht' als iemand hen daarvoor betaalt, en oliemaatschappijen doen dat. Het gas komt bij deze winningsmethode weliswaar niet terug in de atmosfeer, maar de gewonnen olie zal wél nieuwe CO₂ in de atmosfeer brengen.

Als het afgevangen CO₂ niet naar de oliewinning gaat, moet het ergens anders heen. Een bruikbare plaats daarvoor zijn lege olie- en gasvelden. Die zijn er genoeg – steeds meer zelfs. Hoewel deskundigen de veiligheidsrisico's van vervoer naar en opslag in zulke velden als buitengewoon klein beoordelen, zijn ze er – in ieder geval in diverse West-Europese landen – niet in geslaagd omwonenden daarvan te overtuigen, met als gevolg dat opslag op grote weerstand stuit. Toch hoeft dat voor DAC geen probleem te zijn: die installaties kunnen overal worden geplaatst, dus ook bovenop lege olie- en gasvelden in onbewoond gebied.

Al met al lijkt het potentieel van DAC vooralsnog beperkt te zijn: te duur en inefficiënt. De prijs zal ongetwijfeld dalen en de efficiëntie stijgen, maar die weg is nog lang. Dat heeft onder meer Bill Gates, de bank Goldman Sachs, vliegtuigbouwer Boeing en diverse anderen er niet van weerhouden in deze technologie te investeren. Hun geld zit in jonge bedrijven als Carbon Engineering, Global Thermostat en Climeworks.

2 Presentatie van klimaat-engineering in onderzoeksrapporten

Samantha Scholte, Monique Riphagen, Edwin Horlings

2.1 Inleiding

Sinds 2009 is er wereldwijd een toename te zien van het aantal onderzoeksrapporten over klimaatengineering. Omdat een deel hiervan specifiek is gericht op politici, beleidsmakers en bestuurders, is het interessant om na te gaan hoe klimaatengineering in deze rapporten wordt gepresenteerd. De verstrekte informatie, en de manier waarop die wordt gebracht, is immers van invloed op het beeld dat politici zich van klimaatengineering vormen. Als iets goeds, of juist als iets gevaarlijks – en alle mogelijke standpunten daartussenin.

Omdat die ‘framing’ vervolgens bepalend is voor beleidskeuzes, analyseren we in dit hoofdstuk dertien rapporten van gezaghebbende en/of invloedrijke instituten en organisaties. Het gaat om twaalf rapporten uit de periode 2009-2011, plus het rapport van de National Academy of Sciences dat al in 1992 is gepubliceerd. Zie het kader voor een nadere toelichting op de keuze voor deze dertien rapporten.

We vergelijken de rapporten op een aantal aspecten, zoals de reden om ze te publiceren, de gehanteerde definitie van klimaatengineering, de genoemde technologieën, en de (technologische) beoordeling daarvan. Ook gaan we na op welke bronnen de rapporten zijn gebaseerd, en door wie ze zijn geschreven. In relatie hiermee onderzoeken we de breedte van het vakgebied klimaatengineering als wetenschappelijke discipline. Is er sprake van een relatief nieuw wetenschappelijk vakgebied, of bestaat het vakgebied al langer en zijn de wetenschappers vanuit een gevoel van urgentie rapporten gaan schrijven om beleidsmakers te informeren? Tot slot vatten we samen welk beeld er in de rapporten van klimaatengineering gepresenteerd wordt.

Methode

De selectie van de rapporten is gebaseerd op de relevantie ervan voor het nationale en internationale debat over klimaatengineering (Scholte 2012). Het gaat om rapporten van gezaghebbende wetenschappelijke organisaties (zoals The Royal Society) en van gezaghebbende beleidsadviserende instituten; de meeste rapporten zijn in opdracht van de overheid geschreven. Ook het rapport van de internationaal opererende ngo ETC Group (uit Canada) is geselecteerd omdat het van grote invloed is op het debat. Van de dertien rapporten komen er zeven uit de VS, twee uit Groot-Brittannië en twee uit Duitsland. Er is één Nederlands rapport opgenomen, van het onderzoeks-instituut Alterra. Hierin is één hoofdstuk aan klimaatengineering gewijd.

In 1992 verscheen een studie van de Amerikaanse National Academy of Sciences waarin klimaatengineering beperkt is behandeld. Het is een van de eerste rapporten waarin klimaatengineering serieus wordt geëvalueerd, en daarom van toegevoegde waarde.

De inhoud van de rapporten is op een kwalitatieve wijze geanalyseerd. Voor de analyse van de wetenschappelijke basis van de rapporten zijn de belangrijkste bronnen zowel kwalitatief als kwantitatief onderzocht. Bronnen die betrekking hebben op de algemene klimaatproblematiek zijn buiten beschouwing gelaten. Hieronder volgt een chronologisch overzicht van de geselecteerde rapporten.

- **NAS** (National Academy of Sciences), *Policy Implications of Greenhouse Gas Warming. Mitigation, Adaptation and the Science Base*, VS, 1992.
- **The Royal Society**, *Geoengineering the Climate. Science, governance and uncertainty*, GB, september 2009.
- **Alterra**, *Policy options to respond to rapid climate change*, Nederland, november 2009.
- **House of Commons** (Het Britse Lagerhuis), *The Regulation of Geoengineering*, GB, maart 2010.
- **ETC Group**, *Geopiracy. The Case Against Geoengineering*, Canada, oktober 2010.
- **House of Representatives** (Amerikaans Huis van Afgevaardigden), *Engineering the Climate. Research Needs and Strategies for International Coördination*, VS, oktober 2010.
- **CRS** (Congressional Research Service), *Geoengineering. Governance and Technology Policy*, VS, januari 2011.

- **RAND** Corporation, *Governing Geoengineering Research. A Political and Technical Vulnerability Analysis of Potential Near-Term Options*, VS, april 2011.
- **Umwelt Bundes Amt**, *Geoengineering, effective climate protection or megalomania?* Duitsland, april 2011.
- **GAO** (United States Government Accountability Office), *Climate engineering. Technical status, future directions and potential responses*, VS, juli 2011.
- **BPC** (Bipartisan Policy Center), *Geoengineering. A National strategic plan for research on the potential effectiveness, feasibility and consequences of climate remediation technologies*, VS, oktober 2011.
- **WWICS** (Woodrow Wilson International Center for Scholars), *Geoengineering for decision makers*, VS, november 2011.
- **KEI** (Kiel Earth Institute). *Large-Scale Intentional Interventions into the Climate System? Assessing the Climate Engineering Debate*, Duitsland, december 2011.

2.2 Waarom rapporteren over klimaatengineering?

De toename van het aantal rapporten over klimaatengineering is opmerkelijk, omdat de technologieën zich nog in een vroeg stadium van ontwikkeling bevinden. Wetenschappers verwachten niet dat toepassing van met name Solar Radiation Management (SRM) binnen afzienbare termijn tot de mogelijkheden zal behoren. Waarom hebben verschillende instanties dan toch een rapport over klimaatengineering uitgebracht? Uit de dertien geanalyseerde rapporten komen de volgende motivaties naar voren.

Aanzetten tot regulering van onderzoek

Acht van de dertien rapporten zijn geschreven om politici en beleidsmakers al in een vroeg stadium te wijzen op de noodzaak tot regulering van onderzoek naar klimaatengineering. Regulering moet voorkomen dat private ondernemingen of autonoom opererende staten zelfstandig besluiten om tot de toepassing van klimaatengineering over te gaan, met alle risico's en ongewenste (politieke) gevolgen van dien.

Weergeven van de technologische stand van zaken

In zeven rapporten wordt uitgebreid ingegaan op de technologische stand van zaken, om op die manier bij te dragen aan een zinvolle discussie over klimaatengineering. Zo geeft het rapport van The Royal Society naast een beschrijving van de verschillende technologieën ook een (beperkte) evaluatie van potenties en risico's.

Stimuleren van internationaal debat

Drie rapporten zijn gepubliceerd om het internationale debat over klimaat-engineering te stimuleren.

Internationaal niet achter willen blijven in onderzoek

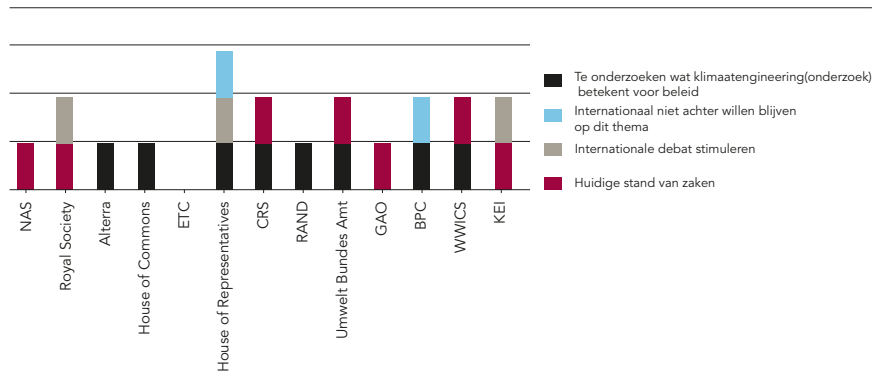
Het Bipartisan Policy Center (BPC) en het Amerikaanse Huis van Afgevaardigden geven in hun rapporten aan dat zij het ongewenst zouden vinden als de VS in internationaal opzicht achter zou blijven in het onderzoek naar klimaatengineering. Dat is verrassend, omdat niet alleen de meeste rapporten, maar ook veel wetenschappelijke artikelen over klimaatengineering uit de VS komen. Het Amerikaanse onderzoek vindt echter vooral plaats aan universiteiten, of wordt door private instellingen gefinancierd. Beide instanties willen de Amerikaanse overheid ertoe aanzetten om het onderzoek naar klimaatengineering financieel te ondersteunen. Het rapport van het Amerikaanse Huis van Afgevaardigden verwoordt dit als volgt: 'There is virtually no federal funding explicitly dedicated to "climate engineering" or "geoengineering" research. It is the opinion of the Chair that any federal climate engineering research program should leverage existing facilities, instruments, skills, and partnerships within federal agencies' (House of Representatives 2010, p. 8).

Ook BPC is van mening dat de overheid het onderzoek naar klimaatengineering moet stimuleren, want zij is 'the only entity that has the incentive, responsibility and capacity to run a broad, systematic and effective program' (BPC 2011, p. 3).

ETC Group: geen expliciete motivatie

De ETC Group noemt geen doelstelling in zijn rapport. Uit de toonzetting kan worden afgeleid dat de ngo een tegengeluid wil laten horen: de ETC Group pleit voor een volledig verbod op klimaatengineering.

De organisaties en instituten hebben dus met name rapporten gepubliceerd omdat zij beleidsmakers willen overtuigen van de noodzaak om al in een vroeg stadium na te denken over regulering en beleid. Om een zinvolle discussie mogelijk te maken geeft een aantal organisaties een overzicht van de verschillende technologieën.

Figuur 2.1 Motivatie om te rapporteren over klimaatengineering

Rathenau Instituut

2.3 Gehanteerde definities van klimaatengineering

In hoeverre lijken de gehanteerde definities op elkaar in de geanalyseerde rapporten? In het rapport van de National Academy of Sciences (NAS) wordt klimaatengineering als volgt gedefinieerd: 'Options that would involve large-scale engineering of our environment in order to combat or counteract the effects of changes in atmospheric chemistry' (NAS 1992, p. 433).

The Royal Society neemt deze definitie over, maar benadrukt dat klimaatengineering draait om het tegengaan van antropogene klimaatverandering. Drie elementen zijn daarmee van belang in de definitie van The Royal Society: de termen 'opzettelijk', 'grootschalig' en 'antropogene klimaatverandering'.

In vier van de dertien rapporten zijn deze drie elementen uit de definitie van The Royal Society overgenomen. In de andere rapporten worden twee van de drie elementen expliciet benoemd. Deze rapporten wijken echter in de benadering van klimaatengineering niet van The Royal Society af. Het ligt dus niet voor de hand dat in deze rapporten van een ander concept van klimaatengineering wordt uitgegaan.

BPC vindt geo- of klimaatengineering een te brede en vage term, en introduceert daarom de term 'climate remediation'. Dit wordt gedefinieerd als 'intentional actions taken to counter the climate effects of past greenhouse gas emissions on the atmosphere'. Deze *reframing* heeft tot veel ophef geleid, omdat de term 'remediation' de suggestie zou kunnen wekken dat klimaatengineering een afdoende remedie tegen klimaatverandering is, waarmee mitigatie overbodig geworden zou zijn.⁵

5 <http://thinkprogress.org/climate/2011/10/06/336676/geoengineering-panel-climate-remediation/?mobile=nc>

Drie auteurs van het BPC-rapport hebben zich gedistantieerd van de term climate remediation. Geo-engineering en klimaatengineering zijn de meest gangbare termen gebleven.

Alterra en het Kiel Earth Institute (KEI) maken een direct onderscheid tussen de technologieclusters Solar Radiation Management (SRM) en Carbon Dioxide Removal (CDR). Hierdoor komt de term klimaatengineering in het Alterra-rapport nauwelijks voor en is de definitie in het KEI-rapport als volgt uitgebreid: 'Technologies that are expressly used to reduce the concentration of CO₂ in the atmosphere or to directly influence the Earth's radiation budget with a view to mitigating of offsetting anthropogenic climate change' (KEI 2011, p. 7).

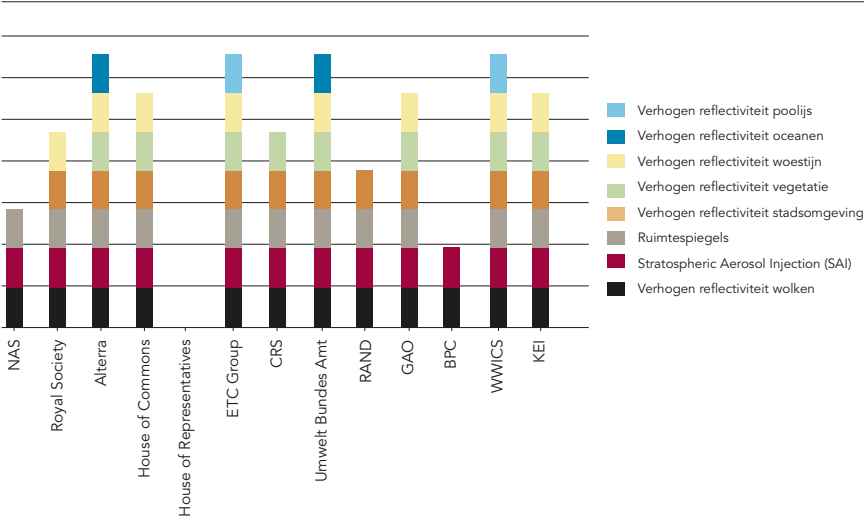
CDR en SRM zijn namelijk zo verschillend van aard dat het de vraag is of ze wel binnen één definitie passen. Zo citeert het Britse Lagerhuis in zijn rapport de hoogleraar Earth and Environmental Engineering Klaus Lackner (Columbia University), die CDR van klimaatengineering zou willen onderscheiden: 'We want to contrast such carbon cycle management with albedo engineering efforts that try to counter greenhouse warming with active efforts of cooling the planet' (House of Commons 2010, p.58). Het Britse Lagerhuis ziet echter niets in dit onderscheid en concludeert dat 'technologies to reduce solar insolation and to increase carbon sequestration should both be considered as geo-engineering options' (ibid.).

Hoewel niet in alle rapporten expliciet wordt ingegaan op alle elementen uit de definitie van The Royal Society, krijgt het concept klimaatengineering wel telkens dezelfde invulling. In alle rapporten wordt zowel SRM als CDR tot klimaatengineering gerekend. Hierbij wordt wel het onderscheid tussen beide soorten technologieën erkend (behalve door het Amerikaanse House of Representatives).

2.4 Besproken technologieën

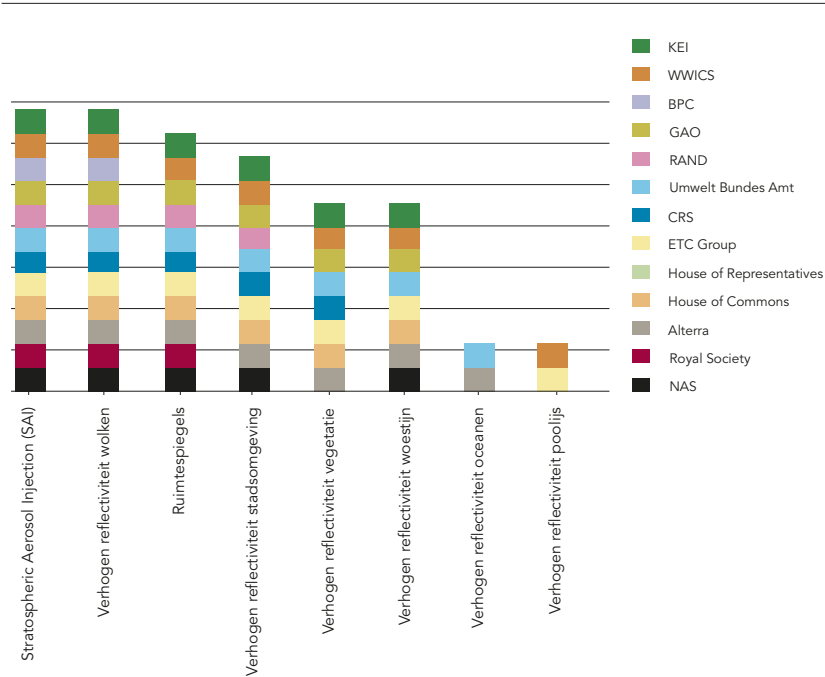
Bestaat er discussie over de vraag welke technologieën onder de noemer klimaatengineering vallen? Wat SRM betreft niet. De figuren 2.2 en 2.3 geven een overzicht van de verschillende vormen van SRM die in de rapporten genoemd worden. Het scala aan technologieën blijkt vrij constant te zijn. In bijna alle rapporten worden genoemd: Stratospheric Aerosol Injection (SAI); het verhogen van de reflectiviteit van wolken; ruimtespiegels; het verhogen van de reflectiviteit van landoppervlak (woestijn, vegetatie of stadsomgeving). Het verhogen van de reflectiviteit van poolijs of van de oceanen wordt in slechts twee rapporten genoemd.

Figuur 2.2 SRM-technologieën per rapport.



Rathenau Instituut

Figuur 2.3 Rapporten per SRM-technologie



Rathenau Instituut

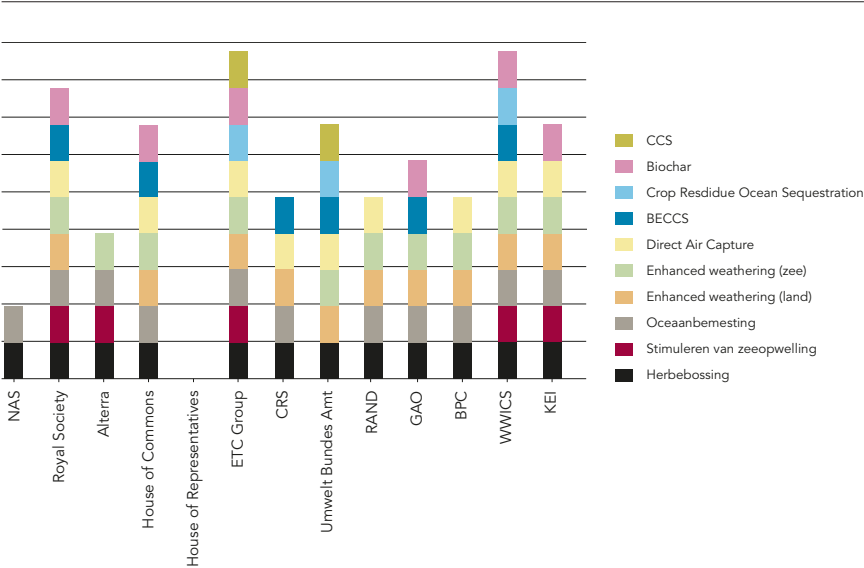
Meer discussie is er over de vraag welke technologieën onder CDR, dan wel onder mitigatie vallen. Sommige bestaande vormen van mitigatie worden in grootschalige vorm tot CDR gerekend. Het gaat hierbij met name om (her)bebossing. The Royal Society zegt hierover: 'Such interventions are not normally considered to be geoengineering' (The Royal Society, p. 10). Gezien de potentie van herbebossing wordt deze technologie toch besproken, net als in de andere rapporten.

IJzerbemesting van oceanen (OIF), versnelde verwerking (enhanced weathering) van mineralen op land en in zee en Direct Air Capture (DAC) worden in het merendeel van de rapporten genoemd. Er is minder eenduidigheid over de technologieën Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) en biochar. Het BPC beschouwt CDR-technologieën die gerelateerd zijn aan energieverbruik niet als vormen van klimaatengineering. BECCS en biochar zijn hier voorbeelden van, omdat je hiermee niet alleen CO₂ uit de atmosfeer kunt halen, maar ook de huidige energievoorziening schoner kunt maken (door in plaats van fossiele brandstoffen biomassa te verbranden).

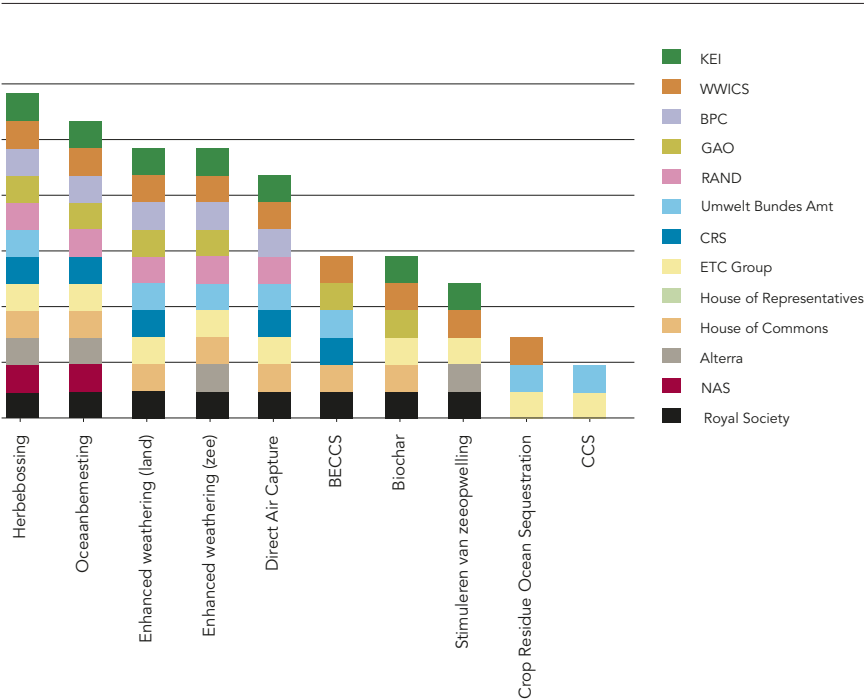
Twee technologieën die relatief weinig worden genoemd zijn het stimuleren van zeeopwelling en Crop Residue Ocean Sequestration (het verpakken en opslaan van biomassa, ondergronds of op de oceaانبodem). Deze technologieën worden niet algemeen als belangrijke en/of kansrijke vormen van klimaatengineering gezien.

Carbon Capture and Storage (CCS), de ondergrondse opslag van CO₂ die direct na de verbranding van fossiele brandstoffen wordt afgevangen, wordt doorgaans niet als vorm van klimaatengineering gezien. CCS wordt alleen in de rapporten van de ETC Group en het Umwelt Bundes Amt genoemd. Volgens de ETC Group gaat het zowel bij CCS als bij klimaatengineering om risicovolle technologieën die niets doen aan de oorzaken van klimaatverandering.

Figuur 2.4 Overzicht van de CDR-technologieën per rapport



Figuur 2.5 Overzicht van de rapporten per CDR-technologie



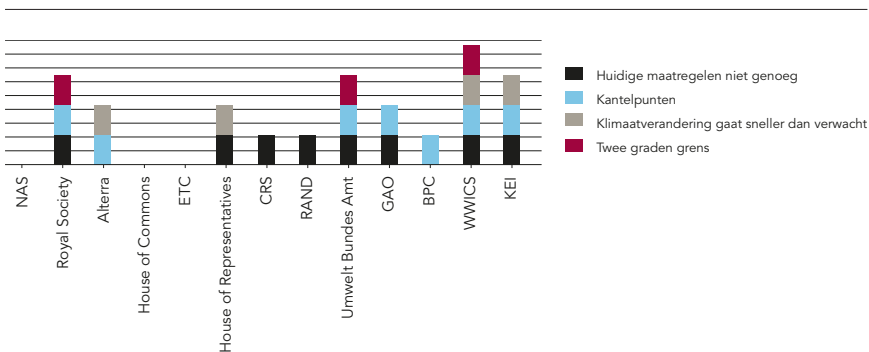
2.5 Argumenten pro klimaatengineering

In alle rapporten wordt klimaatverandering als een ernstig probleem gepresenteerd. In drie rapporten wordt de klimaatverandering gekwantificeerd, waarbij de auteurs zich met name baseren op het vierde IPCC-rapport uit 2007. KEI noemt een verdubbeling van de CO₂-concentratie in 2100, wat een opwarming van 2 tot 4,5 graden tot gevolg kan hebben. NAS geeft een marge van 1,9 tot 5,2 graden aan en volgens The Royal Society kan de temperatuur onder de huidige omstandigheden tot 4 graden stijgen in 2100.

De volgende argumenten worden genoemd om onderzoek naar of toepassing van klimaatengineering te bepleiten:

- De huidige mitigatiemaatregelen zijn niet effectief genoeg (acht rapporten).
- Als een of meer *tipping points* bijna bereikt worden, legitimeert dat toepassing van klimaatengineering (zeven rapporten).
- Als de klimaatverandering zich sneller voltrekt dan verwacht, waardoor het ergste IPCC-scenario in werking zou treden, legitimeert dit toepassing (vier rapporten).
- Voorkomen dat de twee graden-grens gepasseerd zal worden (drie rapporten).

Figuur 2.6 Overzicht van mogelijke redenen voor onderzoek en/of implementatie



Rathenau Instituut

Slechts in vier rapporten wordt ingegaan op de vraag op welk moment je daadwerkelijk tot de inzet van klimaatengineering zou moeten overgaan. BPC, Umwelt Bundes Amt en Alterra zien klimaatengineering als een plan B, een noodoplossing voor het geval dat de opwarming van de aarde extreme vormen aanneemt. Vroegtijdig onderzoek is gelegitimeerd om snel en voorbereid te kunnen handelen op het moment dat er zich zo'n noodsituatie voor zou doen.

CRS ziet klimaatengineering als aanvulling op de huidige mitigatie- en adaptatie-inspanningen om tijd te winnen voor CO₂-reducties. Dit betekent dat het

CRS als enige instantie de mogelijkheid openlaat om klimaatengineering ook in te zetten als er geen sprake is van een dreigende klimaatramp.

De ETC Group verwerpt het plan B-argument. Volgens de ngo is onderzoek naar of implementatie van klimaatengineering onder geen enkele omstandigheid legitiem. Overigens wordt klimaatengineering in geen enkel rapport als oplossing voor het klimaatprobleem gepresenteerd, of als alternatief voor mitigatie. De rapporten zetten in dit opzicht dus niet aan tot *moral hazard*.

2.6 Beoordeling technologieën

In zeven rapporten wordt gesteld dat meer inzicht is vereist in de effectiviteit en gevolgen van de verschillende technologieën, voordat er iets gezegd kan worden over toepassing van klimaatengineering. De technologieën worden vervolgens beoordeeld aan de hand van de criteria risico's, technische haalbaarheid, kosten en effectiviteit (zie tabel 2.1).

Hoewel acht instanties zichzelf ten doel hadden gesteld inzicht te geven in de beleidsimplicaties van klimaatengineering, vormen die beleidsimplicaties geen beoordelingscriterium. Alleen Alterra gaat in zijn rapport beperkt in op de beleidsimplicaties van alle onderzochte technologieën.

Tabel 2.1 Overzicht van de criteria voor de beoordeling van technologieën

Criteria	NAS	Royal Society	Alterra	House of Commons	GAO	WWICS	KEI
Beleids-implicaties	Alleen bebossing		✓				
Risico's	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Technische haalbaarheid		✓	✓		✓		✓
Effectiviteit		✓	✓		✓	✓	✓
Kosten	✓	✓	✓	Alleen voor CDR	✓		✓
Anders:			Consequenties voor NL				Sociaal conflict

In alle rapporten wordt erkend dat er te weinig wetenschappelijke informatie voorhanden is om een kwantitatieve evaluatie van de technologieën mogelijk te maken. De rapporten van GAO en The Royal Society doen toch een poging om bepaalde criteria te kwantificeren. Zo gebruikt GAO het 'technology readiness levels'-systeem (TRL-systeem) om de technologische haalbaarheid aan te geven. TRL 1 is hierbij het laagste niveau waarbij er slechts theoretische kennis

beschikbaar is en TLR 9 het hoogste, waarbij de technologie al een paar keer met succes is toegepast.

SAI scoort een TRL van 1 (*low*). Het bleken van wolken, ruimtespiegels en het verhogen van de reflectiviteit van het aardoppervlak scoren een 2. Ook BECCS, biochar en ijzerbemesting van oceanen scoren niet hoger dan een 2. Alleen Direct Air Capture (DAC) komt tot een TRL van 3. Dat is nog steeds laag, want TRL 4 staat pas voor de mogelijkheid van toepassing in een laboratoriumsetting.

The Royal Society beoordeelt de technologieën in eerste instantie op kwalitatieve wijze en hanteert hiervoor de waarden *low*, *medium* en *high*. Op grond van welke criteria deze kwalificaties tot stand komen, is onduidelijk. In een later stadium kwantificeert het rapport de waarden per criterium, variërend van 1 (*very poor*), tot 5 (*very good*). Hierdoor zou je de neiging kunnen krijgen de punten bij elkaar op te tellen en de technologieën te ranken. Dit raadt The Royal Society echter af: 'No attempt has been made to reduce this multi-criterion evaluation to determine a single overall winner because these criteria are incommensurable, and any such synthesis or selection process must involve explicit consideration of the trade-offs between them' (The Royal Society 2009, p. 48).

The Royal Society geeft een overzicht van de meest kansrijke technologieën. Bij de CDR-methoden gaat het om de technologieën die geen grootschalig grondgebruik vergen, zoals Direct Air Capture. Van de SRM-methoden zijn SAI, het bleken van wolken en de toepassing van ruimtespiegels het meest kansrijk, in de zin van het meest effectief.

In alle rapporten wordt geconcludeerd dat nog er nog relatief weinig wetenschappelijke kennis beschikbaar is over klimaatengineering. Daarom houden alle instituten een pleidooi voor het uitvoeren van verder onderzoek, behalve de ETC Group. KEI maakt een helder onderscheid tussen onderzoek om een betere beoordeling van de technologieën mogelijk te maken en onderzoek gericht op implementatie: 'The purpose of further, more in-depth research into climate engineering is not to prepare for the use of the associated technologies; instead it should be clearly designed to increase our ability to assess this topic' (KEI 2011).

In de overige rapporten wordt dit onderscheid veel minder expliciet gemaakt. Deze rapporten hanteren (impliciet) het plan B-frame: verder onderzoek is noodzakelijk om straks niet met lege handen te staan, als er zich een drastisch klimaatscenario voor zou doen. Hoewel men hoopt dat dit nooit zal gebeuren en implementatie niet wordt gestimuleerd, wordt onderzoek naar klimaatengineering in deze context dus toch uitgevoerd met het oog op een eventueel gebruik. John Shepherd, hoofdauteur van het rapport van The Royal Society, bevestigt dit: 'We need to initiate research so we can understand the intended and unintended consequences of these methods so that, if we ever do need to

deploy them, we can do so in a sensible and effective way' (The Royal Society 2009).

Kortom: in verschillende rapporten staat een beoordeling van de verschillende technologieën aan de hand van de traditionele assessmentcriteria risico's, technische haalbaarheid, effectiviteit en kosten. Hoewel de hoeveelheid wetenschappelijke informatie beperkt is wagen GAO en The Royal Society zich aan een kwantitatieve beoordeling. Deze beoordeling suggereert een mate van zekerheid die nauwelijks waar te maken is en doet geen recht aan de sociale aspecten van klimaatengineering die niet kwantificeerbaar zijn.

2.7 Smalle spreiding aan bronnen

Uit bovenstaande paragrafen blijkt dat de adviezen met betrekking tot klimaatengineering veel op elkaar lijken in de verschillende rapporten. Wie nagaat welke personen er bij de totstandkoming van de verschillende rapporten betrokken zijn, valt het op dat veel namen telkens terugkeren. In deze paragraaf gaan we in op de verschillende bronnen die ten grondslag liggen aan de rapporten en de breedte ervan. We zetten op een rij welke wetenschappers (mede)auteur zijn of gereviewd hebben, welke persoonlijke input wetenschappers hebben geleverd en welke wetenschappelijke publicaties aan de basis liggen van de rapporten.

Auteurs en reviewers

In bijlage 3 (tabel 1) geven we een overzicht van de verschillende auteurs en reviewers die een bijdrage hebben geleverd aan de rapporten. Twee auteurs hebben meegeschreven aan drie rapporten. David Keith en John Shepherd zijn beide medeauteur van de rapporten van The Royal Society en BPC en hebben tevens het rapport van WWICS gereviewd.

Persoonlijke input

Vier rapporten zijn mede tot stand gekomen op basis van bijdragen van experts, zie bijlage 3 (tabel 2). The Royal Society baseerde zijn rapport mede op brieven van wetenschappers en organisaties. Deze zijn slechts gedeeltelijk openbaar. Een ethisch platform heeft input geleverd voor het ethische hoofdstuk.

Het Britse Lagerhuis en het Amerikaanse Huis van Afgevaardigden refereren allebei aan hoorzittingen die hebben plaatsgevonden in opdracht van het Amerikaanse Huis van Afgevaardigden. GAO consulteerde 34 experts.

David Keith, medeauteur van de rapporten van The Royal Society en BPC, heeft een bijdrage geleverd aan de rapporten van het House of Commons, het House of Representatives en GAO. John Shepherd heeft meegewerkt aan het rapport van GAO. Naast Keith en Shepherd hebben Ken Caldeira, Granger

Morgan, Philip Rasch en Alan Robock hetzij als auteur, hetzij op een andere wijze een bijdrage geleverd aan drie of meer rapporten.

Literatuur

Gezamenlijk verwijzen de rapporten naar 327 wetenschappelijke publicaties. Dit is relatief weinig en suggereert dat het onderzoeksveld klimaatengineering klein is. Het is daarom niet verwonderlijk dat de rapporten vaak naar dezelfde artikelen verwijzen; 31 procent van de artikelen wordt in minstens twee rapporten genoemd als referentie. Van de grijze literatuur wordt dertien procent in twee of meer rapporten als bron gebruikt. Alle rapporten verwijzen naar het rapport van The Royal Society, uiteraard met uitzondering van het NAS-rapport dat al in 1992 verscheen.

In bijlage 3 (tabel 3) staat een overzicht van de wetenschappelijke artikelen waar in vijf of meer rapporten aan wordt gerefereerd. Een deel van de artikelen wordt zo vaak in de literatuurlijsten opgenomen omdat het desbetreffende onderzoeksgebied klein is en het aantal publicaties beperkt. Dit geldt bijvoorbeeld voor de publicaties van Early (1989), Angel (2006) en Schuiling (2006): weinig anderen hebben gepubliceerd over ruimtespiegels en olivijn, in tegenstelling tot bijvoorbeeld Stratospheric Aerosol Injection (SAI).

Wie de volledige literatuurlijst bekijkt, ziet dat er negentien keer is verwezen naar onderzoek van David Keith en Ken Caldeira en achttien keer naar Alan Robock. Met name diens artikel '20 reasons why geoengineering may be a bad idea' is veelvuldig aangehaald.

David Keith en Ken Caldeira leveren bijdragen als auteurs, als reviewers en als geraadpleegde deskundigen. Beide wetenschappers doen onderzoek naar verschillende vormen van klimaatengineering, variërend van ijzerbemesting tot SAI. Hieruit kan geconcludeerd worden dat klimaatengineering een jonge en relatief kleine wetenschappelijke discipline is, waar door een beperkte groep wetenschappers interdisciplinair over wordt nagedacht en gepubliceerd. Het is ook deze beperkte groep wetenschappers die als intermediair fungeert tussen het wetenschappelijk bedrijf en de politiek. Zij maken de wetenschappelijke resultaten toegankelijk voor een breder publiek. Het risico hiervan is echter dat politici en beleidsmakers eenzijdig geïnformeerd worden en dat andere geluiden onvoldoende doorklinken.

2.8 Hoe groot is de wetenschappelijke basis van klimaatengineering?

De wetenschappelijke basis die ten grondslag ligt aan de geanalyseerde rapporten is relatief klein. In deze paragraaf gaan we wat uitgebreider in op de omvang en groei van klimaatengineering als wetenschappelijke discipline. Klopt het inderdaad dat het aantal wetenschappelijke publicaties per discipline

zo beperkt is, of wordt er in de rapporten om een andere reden slechts gebruik gemaakt van een beperkt aantal publicaties? We doen hierbij geen uitspraken over de betrouwbaarheid of kwaliteit van de publicaties. Drie vragen staan centraal:

- Hoeveel publicaties zijn er verschenen in de periode tussen 2001 en 2011?
- Hoe groot is de aandacht voor de verschillende technologieën (ten opzichte van elkaar) en hoe snel groeit die aandacht per technologie?
- Hoe actief zijn Nederlandse wetenschappers op het gebied van klimaat-engineering?

Methode

We hebben gezocht naar wetenschappelijke publicaties in de Web of Science (WoS). De WoS is een van de grootste indexen van wetenschappelijke publicaties. In deze bron vinden we metadata over meer dan 40 miljoen publicaties. Dit betekent dat we niet de publicaties zelf vinden, maar de informatie die de publicaties beschrijft, zoals de auteurs en hun affiliaties, de titel en samenvatting van het artikel, het tijdschrift en jaartal van publicatie, en de verwijzingen naar andere literatuur.

We hebben gezocht in de vijf indexen van de WoS, namelijk de Science Citation Index Expanded, Social Sciences Citation Index, Arts & Humanities Citation Index, Conference Proceedings Citation Index-Science, and Conference Proceedings Citation Index-Social Science & Humanities.

Om de omvang en groei van het vakgebied klimaatengineering te kunnen beoordelen, moeten we het afbakenen. Dat wil zeggen dat we zoektermen formuleren waarmee de publicaties gevonden kunnen worden die bij klimaatengineering horen. De afbakening is gebaseerd op een aantal reviewartikelen waarin de technische haalbaarheid, de mogelijke opbrengsten en de risico's van de *state-of-the-art* van het onderzoek naar klimaatengineering wordt beoordeeld (Bellamy, Chilvers, Vaughan & Lenton, 2012; Crabbe 2009; Goldblatt & Watson 2012; Hulme 2012; Lenton & Vaughan 2009; Preston 2013; Robock, Marquardt, Kravitz & Stenchikov 2009; Russell et al. 2012; Shepherd 2012; Vaughan & Lenton 2011; Williamson et al. 2012).

Op basis van deze artikelen is een aantal technologieën buiten beschouwing gelaten, omdat ze tot mitigatie worden gerekend (zoals Carbon Capture and Storage, CCS) of conventionele oplossingen betreffen, zoals herbebossing en CO₂-arme brandstoffen (Shepherd 2012; Vaughan & Lenton 2011).

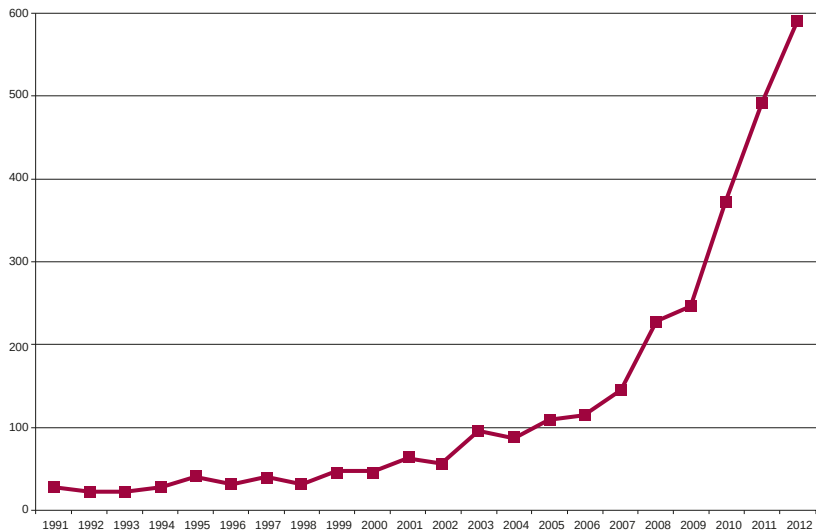
De kwaliteit van de afbakening wordt beoordeeld aan de hand van twee criteria. Vind je exact wat je wilt vinden en niets anders (*precisie*)? En vind je alles wat je wilt vinden (*volledigheid*)? De zoektermen zijn zo gedefinieerd dat we zoveel mogelijk alleen de specifieke technologieën vinden (zie bijlage 4). Dat is gunstig voor de precisie, maar gaat ten koste van de volledigheid. Het blijkt echter niet in alle gevallen eenvoudig om het onderscheid te maken tussen onderzoek naar grote natuurlijke processen die door allerlei onderzoekers worden onderzocht en het technisch ingrijpen in het systeem. Het bleek bijvoorbeeld niet mogelijk om de wetenschappelijke publicaties over *ocean upwelling* en *ocean downwelling* te onderzoeken. Deze technologieën zijn buiten beschouwing gelaten. Ook dat is gunstig voor de precisie en ongunstig voor de volledigheid. Het resultaat is wel representatief: de voornaamste methoden zijn in kaart gebracht, waaronder een aantal kleinere.

Klimaatengineering als geheel

Wanneer we de resultaten van alle zoektermen samen nemen, ontstaat het beeld dat in figuur 2.7 wordt getoond. In totaal hebben we 3.531 publicaties gevonden, waarvan 2.964 in de periode 1991-2012. Tot het jaar 2000 werden wereldwijd minder dan 50 artikelen per jaar gepubliceerd. Dit aantal groeide echter gestaag en tegen het einde van de periode, in 2011 en 2012, verschenen wereldwijd meer dan 400 publicaties per jaar.

Tussen 2001 en 2012 groeide de wereldwijde output van publicaties over klimaatengineering gemiddeld met 22 procent per jaar. Dit is meer dan vijf keer zo snel als het groeitempo van de totale wetenschappelijke output in dezelfde periode (circa 4 procent per jaar). De wetenschappelijke specialisatie klimaatengineering is dus in opkomst.

Figuur 2.7 Het totale aantal gevonden wetenschappelijke publicaties over klimaatengineering, 1991-2012.



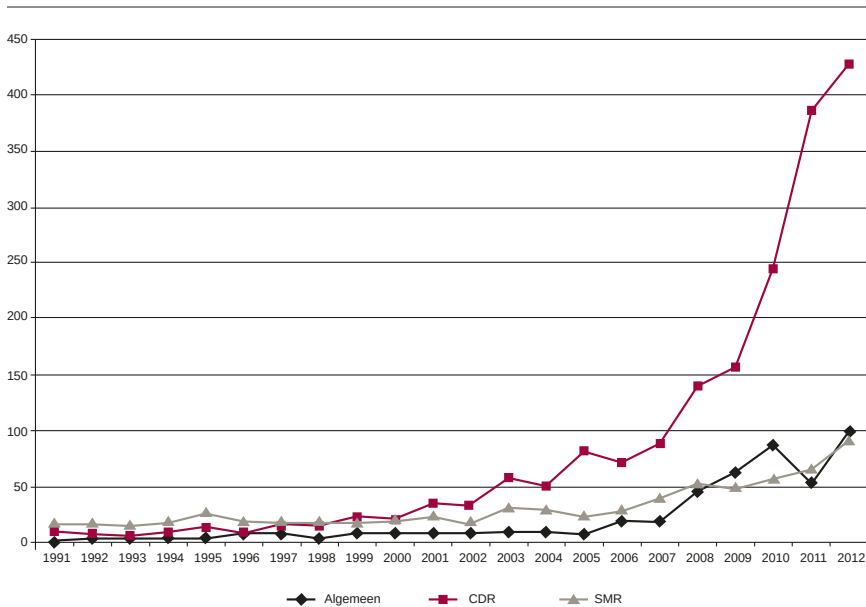
Bron: Thomson Reuters' Web of Science (september 2013)

Rathenau Instituut

Groei

Hoe groot zijn de verschillende technologieën in wetenschappelijk opzicht ten opzichte van elkaar en hoe snel groeien ze? Uit figuur 2.8 blijkt dat de meeste wetenschappelijke aandacht uitgaat naar CDR. Dit cluster aan technologieën is wat betreft wetenschappelijke publicaties het grootst en groeit ook het snelst. Het aantal wetenschappelijke artikelen over SRM groeit ook, maar minder snel. Opvallend is de groei in het aantal publicaties dat niet ingaat op een specifieke technologie, maar het onderwerp in brede zin beschouwt. Hier vinden we onder andere de reviewartikelen waar onze zoektermen vandaan komen.

Figuur 2.8 Het aantal wetenschappelijke publicaties per specialisatie binnen klimaat-engineering, 1991-2012



Rathenau Instituut

Tabel 2.2 laat zien hoeveel publicaties per specifieke technologie gevonden zijn. Dit aantal publicaties geeft een indicatie voor de totale omvang van het vakgebied. Uit de tabel blijkt dat sommige technologieën wetenschappelijk intensiever worden onderzocht dan andere. Vergelijk bijvoorbeeld BECCS met de ijzerbemesting van oceanen, en het bleken van wolken met de ruimtespiegels. Ook is te zien dat een aantal specialisaties - bijvoorbeeld biochar - zeer snel in omvang toeneemt.

Tabel 2.2 Aantal wetenschappelijke publicaties per technologie en groei in 2001-2012

Specialisatie	Totale output 2001-2012	Output in 2001-2002	Output in 2011-2012	Gemiddelde jaarlijkse groei in 2001-2012
<i>Klimaatengineering in het algemeen</i>	476	16	152	25%
<i>Carbon Dioxide Removal</i>	1893	67	814	28%
BEC(C)S	810	46	189	15%
IJzerbemesting van oceanen	134	12	24	7%
Biochar	663	3	476	66%
Direct Air Capture (DAC)	62	4	19	17%
Carbon storagea				
	229	2	119	50%
<i>Solar radiation management</i>	683	40	157	15%
Reflectie in de ruimte	125	13	18	3%
(Sulfaat)stofdeeltjes in de stratosfeer	169	7	28	15%
Wolken bleken	271	14	58	15%
Vergroten reflectiviteit land (landalbedo)				
	123	6	53	24%
TOTAALb	2964	123	1083	24%

a) Technologie gerelateerd aan de opslag van CO₂ in het kader van klimaatengineering.

b) Het totaal is het resultaat van de combinatie van alle zoektermen en is lager dan de som van alle afzonderlijke technologieën, omdat sommige publicaties meerdere zoektermen bevatten.

Rathenau Instituut

Klimaatengineering als wetenschappelijke discipline in Nederland

Zoals in de meeste wetenschapsgebieden zijn de Verenigde Staten de grootste producent van publicaties over klimaatengineering. Van alle artikelen is 43 procent (1.289 publicaties) geschreven door een auteur met een Amerikaanse affiliatie. China, Groot-Brittannië, Duitsland zijn ieder betrokken bij ongeveer 10,4 procent, 8,3 procent en 8,2 procent van de publicaties. Hoe actief zijn Nederlandse wetenschappers?

Van de 2.964 publicaties over klimaatengineering die we in de WoS hebben gevonden, zijn er bij 51 artikelen auteurs met een Nederlandse affiliatie betrokken. Het Nederlandse aandeel is daarmee circa 2 procent. In 2001-2002 ging het om slechts 2 publicaties (1,6 procent); in 2011-2012 om 21 publicaties (1,9 procent). Uit tabel 2.3 blijkt dat Nederlandse wetenschappers net als wetenschappers uit de rest van de wereld meer onderzoek doen naar CDR dan naar SRM. Ook blijkt dat een aantal technologieën in Nederland niet onderzocht wordt (DAC, SAI en het vergroten van de reflectiviteit van het landoppervlak).

Tabel 2.3 Aantal wetenschappelijke publicaties per technologie en groei in 2001-2012

Specialisatie	Publicaties wereldwijd	Nederlandse publicaties
<i>Klimaatengineering in het algemeen</i>	426	5
<i>Carbon Dioxide Removal</i>	1772	32
BEC(CS)	714	14
IJzerbemesting van oceanen	123	3
Biochar	661	6
Direct Air Capture	52	1
Carbon storage	227	8
<i>Solar Radiation Management</i>	503	9
Reflectie in de ruimte	96	3
(Sulfaat)stofdeeltjes in de stratosfeer	115	1
Wolken bleken	188	5
Vergroting reflectiviteit land (landalbedo)	109	-
TOTAALa	2614	46

a) Het totaal is het resultaat van de combinatie van alle zoektermen en is lager dan de som van alle afzonderlijke technologieën, omdat sommige publicaties meerdere zoektermen bevatten.

Rathenau Instituut

Conclusie

Klimaatengineering is een relatief klein maar snel groeiend wetenschappelijk veld. De breedte van de wetenschappelijke basis verschilt per technologie. Er zijn meer publicaties uitgebracht over CDR-technologieën en minder over SRM. Naast het technische en natuurwetenschappelijke onderzoek naar specifieke oplossingen, vindt er tevens sociaalwetenschappelijk onderzoek plaats en onderzoek naar de mogelijkheden en risico's van klimaatengineering in het algemeen. Ook deze groep publicaties groeit snel. Nederlandse wetenschappers hebben slechts een klein aantal artikelen per jaar geproduceerd, waaruit we kunnen concluderen dat het wetenschappelijk onderzoek naar klimaatengineering in Nederland zeer beperkt van omvang is.

2.9 Conclusie

Sinds 2009 heeft een aantal gezaghebbende instituten adviesrapporten gepubliceerd over klimaatengineering. De meeste van deze instituten hebben een taak in advisering van de overheid. De inhoud van hun rapporten kan dus een belangrijke rol spelen in de positie die de overheid inneemt ten opzichte van klimaatengineering. In dit hoofdstuk zijn daarom dertien rapporten inhoudelijk geanalyseerd.

Allereerst kunnen we concluderen dat alle organisaties klimaatverandering als een ernstig probleem presenteren. Ze gebruiken allemaal dezelfde term: geo- of klimaatengineering. Alleen BPC spreekt van 'climate remediation', maar inhoudelijk wordt daarmee hetzelfde bedoeld.

De rapporten zijn met name geschreven om politici en beleidsmakers te informeren over klimaatengineering en over de technologische stand van zaken, om zo een geïnformeerd politiek en maatschappelijk debat mogelijk te maken. De instanties zien namelijk een belangrijke rol weggelegd voor overheden om het onderzoek naar en de eventuele toepassing van klimaatengineering te reguleren. Een zelfstandige inzet van klimaatengineering zonder regulering en gericht beleid wordt als onwenselijk gezien.

Praktisch alle rapporten maken een onderscheid tussen technologieën die zonlicht weerkaatsen, Solar Radiation Management, en technologieën die CO₂ uit de lucht halen en opslaan, Carbon Dioxide Removal. De introductie van dit onderscheid roept de vraag op of beide soorten technologie wel onder de noemer klimaatengineering moeten worden gebracht. De verschillen zijn zo groot dat de discussies over beide vormen een verschillende kant op lijken te gaan. De discussie over SRM richt zich met name op de risico's, terwijl de discussie over CDR meer lijkt te gaan over kosten en effectiviteit. Daarnaast bestaat er discussie over de vraag of verschillende vormen van CDR niet tot mitigatie gerekend moeten worden, omdat ze gebruik maken van traditionele vormen van CO₂-opslag die ook als mitigatiemaatregelen worden ingezet, alleen nu grootschaliger en op wat andere wijze. Denk hierbij bijvoorbeeld aan grootschalige herbebossing of aan BECCS. Sommige wetenschappers willen deze technologieën loskoppelen van het begrip klimaatengineering, omdat ze volgens hen geassocieerd zullen worden met SRM-technologieën, die veel controversiëler zijn. Deze associatie zou een barrière kunnen opwerpen voor implementatie.

Uit de rapporten rijst een vrij duidelijk beeld op van de technologieën die onder de noemer klimaatengineering vallen. De meeste rapporten die erop ingaan, noemen dezelfde technologieën. Voor SRM zijn dat SAI en het bleken van wolken, voor CDR (her)bebossing en ijzerbemesting.

In een paar rapporten wordt de potentie van deze technologieën beoordeeld, op de traditionele assessmentaspecten risico's, technische haalbaarheid, effectiviteit en kosten. Dat valt nog niet mee, omdat de kennis over de technische haalbaarheid nog zeer beperkt is, net als de kennis over de mogelijke effecten, en dus over de risico's. Voor de kosten moet een grote bandbreedte worden aangehouden. Hoewel The Royal Society zich bewust is van de beperkte waarde van zo'n technisch assessment, worden de criteria in het rapport toch kwantitatief beoordeeld. Dit suggereert een hardere analyse dan in werkelijkheid heeft plaatsgevonden.

Sociale aspecten worden, voor zover ze al aan de orde komen, nauwelijks uitgewerkt. Denk bijvoorbeeld aan de gevolgen van klimaatengineering voor specifieke bevolkingsgroepen, of voor toekomstige generaties. Of aan de manier waarop regulering van klimaatengineering tot stand zou moeten

komen. Om een zinvol maatschappelijk debat mogelijk te maken, had hier meer aandacht aan besteed moeten worden.

Het is niet verwonderlijk dat de rapporten voor een groot deel dezelfde technologieën beschrijven. Uit de analyse blijkt dat een kleine groep wetenschappers betrokken is bij de totstandkoming van meerdere onderzochte rapporten. Dit is deels te verklaren uit het feit dat de onderzoekswereld nog klein is op het gebied van klimaatengineering. (Al groeit het aantal wetenschappelijke publicaties snel.) Het gevaar bestaat dat het wetenschappelijke, en daaruit voortvloeiende beleidsmatige debat hierdoor eenzijdig gevoerd wordt. De wetenschappers die een rol spelen in beleidsadvies, hebben relatief veel invloed op de politieke agenda.

Tot slot vormt het rapport van de Canadese ETC Group, de enige ngo die in deze analyse is opgenomen, een grote uitzondering in het geheel. De ETC Group pleit namelijk voor een volledig verbod op klimaatengineering.

3 Discussie over klimaatengineering

Monique Riphagen

3.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is vastgesteld dat het aantal wetenschappelijke publicaties over klimaatengineering sinds 2000 sterk is gegroeid, en dat er sinds 2009 ook de nodige beleidsrapporten over het onderwerp zijn verschenen. Deze rapporten zijn niet alleen geschreven om de overheid te informeren, maar ook om het algemene publiek van deze nieuwe technologieën op de hoogte te stellen. Het valt daarom te verwachten dat de belangstelling voor klimaatengineering zal toenemen. Vooral in de VS, Groot-Brittannië en Duitsland, waar de meeste beleidsrapporten verschenen zijn (Scholte 2012; Nerlich & Jaspal 2012).

Klimaatengineering is een voorbeeld van een opkomende technologie, een *upstream technology*. Hiervan is sprake 'if significant research and development has yet to commence, risks and benefits are highly uncertain, and entrenched attitudes or social representations have yet to be established' (Pidgeon et al. 2012). Hoewel nog veel onderzoek is vereist voordat klimaatengineering zal worden toegepast, staat het onderwerp al serieus op de agenda bij een vooralsnog kleine, maar invloedrijke groep wetenschappers en instituten (ibid.; zie ook hoofdstuk 2 van dit rapport).

Eerdere introducties van maatschappelijk omstreden technologieën, zoals nanotechnologie, laten zien welke factoren relevant zijn voor maatschappelijke weerstand, en welke niet (ibid.). Kennis blijkt bijvoorbeeld niet zo'n relevante factor te zijn. Het is niet zo dat burgers bezwaar maken tegen een technologie omdat ze er weinig van af weten, of dat meer kennis vanzelf tot een hogere graad van acceptatie leidt. De risico's die aan een technologie verbonden zijn, en met name de mate waarin die vrijwillig worden aangegaan en beheersbaar zijn, vormen wél een belangrijke factor in het maatschappelijk debat. 'All other things equal, we find technologies more unacceptable if they are imposed on us (rather than voluntarily undertaken), are relatively uncontrollable if things go wrong, have potential for unknown side-effects, in the worst case could lead to catastrophic outcomes (however unlikely) and involve processes perceived to be "unnatural" or to directly interfere with Nature' (ibid., p. 4180). Andere factoren die het debat kunnen sturen, zijn de mate van vertrouwen die burgers hebben in het toezicht op de uitvoering van de technologieën, het 'onderbuik-

gevoel' dat de technologie oproept, en associaties met historische contro-verses. Bijvoorbeeld met luchtvervuiling in het geval van Stratospheric Aerosol Injection (SAI) (ibid.).

Gegeven deze factoren is er maatschappelijke controverse te verwachten over klimaatengineering. Wetenschappers hebben immers aangegeven dat er nadelen en risico's aan klimaatengineering verbonden zijn. Bovendien vragen de meeste technologieën om een grootschalige toepassing, waar individuele burgers geen directe controle of invloed op uit kunnen oefenen. De manier waarop het publieke debat zich zal ontwikkelen, zal mede bepalen hoe bestuurders op de verschillende technologieën zullen inzetten; voor welke technologieën zij onderzoek en praktijktesten zullen stimuleren, en voor welke niet.

Het publieke debat wordt op zijn beurt medebepaald door de manier waarop de media over klimaatengineering berichten, en door de houding die belangrijke stakeholders, zoals ngo's, in het klimaatdebat zullen innemen. Paragraaf 3.2 gaat over de 'framing' van klimaatengineering in Engelstalige dagbladen. Deze frames geven weer vanuit welke perspectieven het onderwerp belicht kan worden, waarmee ze een indicatie geven van de argumenten die een rol kunnen gaan spelen in het publieke debat. Paragraaf 3.3 gaat over de bekendheid van het bredere publiek met het onderwerp klimaatengineering, en beschrijft de reactie die burgers geven wanneer ze voor het eerst met het onderwerp worden geconfronteerd. In paragraaf 3.4 worden de uitkomsten van interviews met zestien stakeholders in het Nederlandse klimaatdebat samengevat; het hoofdstuk sluit af met verslagen van de afzonderlijke interviews.

3.2 Klimaatengineering in de media

Scholte, Vasileiadou & Petersen (2013) onderzochten de aandacht voor klimaatengineering in Engelstalige kranten in de periode 2006-2011.⁶ De belangstelling voor het onderwerp nam in deze periode in zijn geheel toe, met een piek in 2009, doordat The Royal Society in dat jaar zijn rapport had uitgebracht. Geanalyseerd is hoe de kranten over het onderwerp hebben geschreven, met andere woorden: hoe de kranten het onderwerp hebben geframed. Scholte et al. onderscheiden negen frames, zie tabel 3.1.

6 'The corpus for this analysis was derived by searching through the newspaper database LexisNexis using "geoengineering", "geo-engineering" and "climate engineering" as keywords. A time span of 10 years (2002–2011) was chosen (Nerlich & Jaspal 2012). We selected the more elite English-speaking newspapers and those with high circulation rates, as these often tend to influence more regional or local news outlets (Nisbet et al. 2003). Only articles in which climate engineering was the main theme were selected: this included both news items and commentaries. This narrowed down the corpus to 181 articles. All but three of those articles were written between 2006 and 2011.' (Scholte, Vasileiadou & Petersen 2013).

Tabel 3.1 Verschillende klimaatengineeringsframes.

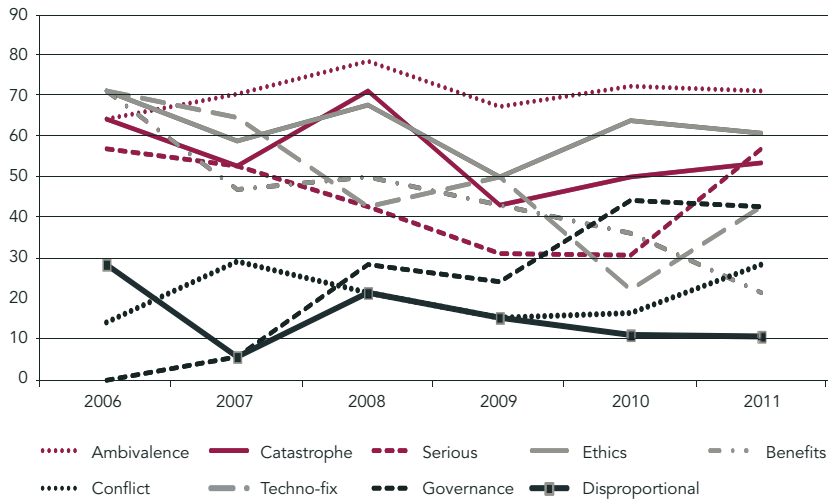
Frame	Omschrijving
Ambivalentie	Risico's en voordelen worden gewogen.
Vermijden van catastrofes	Klimaatengineering voorkomt ernstige klimaatschade.
Klimaatengineering als noodscenario.	
Pragmatisme	Neutraal; klimaatengineering is in opkomst.
Ethisch	Ethische principes spelen een rol in het debat.
Voordelen voor de maatschappij	Klimaatengineering kan klimaatverandering (helpen) voorkomen.
Controverse	Beschrijft controverse en debat. Verwijst naar conflicten tussen industrieën of organisaties en naar conflicten tussen landen.
'Technofix'	Klimaatengineering als 'technofix'.
Governance	Vragen over de regulering van klimaatengineering.
Buitenproportioneel	Klimaatengineering beschreven als buitenproportionele maatregel.

Bron: Scholte, Vasileiadou & Petersen (2013)

Rathenau Instituut

In 2006 werd met name geschreven over de positieve aspecten van klimaatengineering, met 'voordelen voor de maatschappij' en 'technofix' als dominante frames, naast de neutrale frames ambivalentie en pragmatisme. Daarnaast werd aandacht besteed aan de ethische aspecten. Het frame 'governance' was nog afwezig. In de loop der jaren nam het aantal frames toe, waardoor de kranten de breedte van de discussie over klimaatengineering in 2011 beter representeren. De opkomst van de frames 'controverse' en 'governance' wijst er volgens de auteurs op dat sociale en politieke aspecten een grotere rol gaan spelen in het debat over klimaatengineering en dat de discussie zich aan het verbreden is.

Uit deze analyse valt af te leiden dat de ontwikkeling van het debat in de media parallel verloopt aan de ontwikkeling van het wetenschappelijk debat. In eerste instantie werd door wetenschappers vooral vanuit het noodscenario-frame over klimaatengineering gesproken en benoemden ze de voordelen voor de samenleving. Inmiddels heeft het wetenschappelijk debat zich verbreed en worden er vragen aan de orde gesteld over de morele aspecten van klimaatengineering en over de regulering ervan, zowel in de wetenschappelijke literatuur als op symposia en congressen. Deze aspecten zullen ook een belangrijke rol gaan spelen in het politieke en maatschappelijke domein.

Figuur 3.1 De ontwikkeling van de verschillende frames in de tijd.

Bron: Scholte, Vasileiadou & Petersen (2013)

Rathenau Instituut

3.3 Houding van burgers

De publieke belangstelling voor het onderwerp klimaatengineering is nog vrij gering, maar er zijn ook nog maar weinig mensen bekend met het onderwerp. In de studie van Pidgeon et al. (2012) gaf zes procent van de respondenten aan 'enigszins' van het onderwerp af te weten; slechts één procent wist er naar eigen zeggen 'veel' van af. Ook in een publieke dialoog die in opdracht van de Natural Environment Research Council (NERC) werd georganiseerd, bleek dat de kennis van en het bewustzijn over klimaatengineering in eerste instantie laag was (Ipsos MORI 2010). Nadat de deelnemers geïnformeerd waren, bleek dat niemand principieel tegen elke vorm van klimaatengineering was. Het 'noodscenario'-frame was ook hier dominant.

Wel bleek de ene technologie acceptabeler voor de deelnemers dan de andere. Hier bleek te gelden: hoe natuurlijker, hoe beter. Bebossing en biochar werden daarom als relatief onproblematisch beschouwd. Oceaanbemesting werd al als problematischer gezien, maar werd niet uitgesloten. Over DAC was het oordeel positief. Niet alleen omdat het lokaal kan worden toegepast, zonder internationale regulering, maar ook omdat het CO₂ relatief snel uit de lucht haalt, sneller dan bij bebossing het geval is. Over de SRM-opties waren de deelnemers minder enthousiast, omdat die volgens hen geen oplossing bieden voor de te hoge concentratie aan CO₂ in de atmosfeer. Van de SRM-technologieën waren de burgers nog het meest (hoewel niet erg) te spreken over cloud whitening en SAI. De ruimtespiegels werden gezien als duur en risicovol.

Volgens de onderzoekers vonden de deelnemers het zowel vanuit ethisch als praktisch oogpunt belangrijk om de toepassing van klimaatengineering aan mitigatie te verbinden. De meerderheid wilde verschillende vormen van klimaatengineering met mitigatie-inspanningen combineren. Dit resultaat is interessant, omdat het ingaat tegen het *moral hazard*-argument dat steun voor klimaatengineering het draagvlak voor mitigatie-inspanningen ondermijnt (Ipsos MORI 2010). In hoofdstuk 4 wordt dit argument nader besproken.

3.4 Nederlandse stakeholders in het klimaatdebat

3.4.1 Interviews over klimaatverandering en klimaatengineering

Anders dan in de Verenigde Staten en Groot-Brittannië vindt er in Nederland vooralsnog geen publiek debat over klimaatengineering plaats. Om meer inzicht te krijgen in de houding van klimaatwetenschappers, ngo's, klimaat-sceptici, adviesbureaus en overige stakeholders in het klimaatdebat, heeft het Rathenau Instituut vertegenwoordigers van deze groepen geïnterviewd. De verslagen van de afzonderlijke gesprekken zijn aan het eind van dit hoofdstuk opgenomen als intermezzo in dit rapport; bijlage 5 geeft een overzicht van alle geïnterviewden en hun functies. Het aantal interviews met stakeholders is weliswaar te gering om algemene conclusies te kunnen trekken met betrekking tot alle spelers in het Nederlandse klimaatdebat, maar de gesprekken geven wel een indruk van de in Nederland heersende houding ten opzichte van klimaatengineering. De geïnterviewden is onder andere gevraagd naar hun perceptie van de ernst van de klimaatproblematiek, hun vertrouwen in mitigatie- en adaptatiebeleid en hun houding ten opzichte van klimaatengineering. Daarbij is een onderscheid gemaakt tussen SRM en CDR. Tabel 3.1 geeft een overzicht van deze informatie.

Tabel 3.1 Houding ten opzichte van klimaatengineering

Geïnterviewde	Houding SRM	Houding CDR	Ernst klimaatprobleem	Houding mitigatie/adaptatie
De Baar	-	+/-	+	
Crok	-	+/-	-	-
Duyvendak	+/-	+/-	+	+/-
De Gans	+/-	+/-	+	+/-
Knops	-	+	+	-
Oude Boerrigter	+/-	+	+/-	
Rooijers	+/-	+/-	+	-
Schipper	-	+/-	+	+
Schöne	+/-	+/-	+	-
Schuiling	-	+	+	-
Simons	+/-	+/-	+	+
Sluijs		+/-	+/-	+
Stuut		+/-	+	
Vellinga	-	+/-	+	+
Van Vuuren	-	+/-	+	+
Wit	+/-	+	+	-

Rathenau Instituut

3.4.2 Ervaren ernst van het klimaatprobleem

Alle geïnterviewden ervaren de opwarming van de aarde als een ernstig probleem, behalve wetenschapsjournalist en klimaatscepticus Crok. Volgens hem is een causaal verband tussen de stijgende CO₂-emissies en de opwarming van de aarde onvoldoende bewezen. Andere factoren, zoals de toegenomen intensiteit van de zon, worden volgens hem vaak genegeerd in het klimaat-onderzoek.

Tussen de overige geïnterviewden bestaat wel verschil van mening over de mate van ernst. Van Vuuren is van mening dat de planeet zeker opwarmt, maar plaatst de kanttekening dat er wat hem betreft geen sprake is van rampzaligheid of van doemscenario's. Ook Sluijs waakt voor overdreven alarmisme. Volgens Van Vuuren en Sluijs is het risico op kantelpunten aanwezig, maar zijn deze moeilijk te voorspellen. Schuiling denkt dat het voortbestaan van de mensheid niet op het spel zal komen te staan, maar het is voor hem wel de vraag in hoeverre een land als Bangladesh de gevolgen van klimaatverandering zal overleven.

Duyvendak is van mening dat klimaatverandering een groot en serieus probleem is, waarvan de gevolgen in Nederland weliswaar nog niet voelbaar zijn, maar in ontwikkelingslanden wel. Hij gaat ervan uit dat ook onze kinderen met de gevolgen van klimaatverandering te maken zullen krijgen.

Vellinga acht een globale opwarming van drie graden zeer waarschijnlijk. Volgens De Baar stijgt de gemeten CO₂-concentratie snel en is het afsmelten van de Arctische ijskap zorgwekkend. Knops is alarmistisch over klimaatverandering. Volgens hem is het de vraag of het vier of zes graden warmer wordt - en dus niet of de temperatuurstijging binnen de twee graden blijft. Ook Wit verwacht dat het minstens vier tot zes graden warmer zal worden op aarde. Schuiling geeft aan dat volgens sommige wetenschappers het passeren van kantelpunten zich al aan het voltrekken is.

3.4.3 Verwachting ten aanzien van mitigatie en adaptatie

De gangbare strategieën om klimaatverandering tegen te gaan zijn mitigatie en adaptatie. De meeste geïnterviewden is gevraagd naar hun mening over en verwachtingen ten aanzien van deze twee beleidsstrategieën. Is het mogelijk de opwarming van de aarde door middel van mitigatie te beperken tot de magische twee graden-grens? Kunnen we op adaptatiestrategieën vertrouwen als we onze voeten droog willen houden?

Volgens Crok is er weliswaar geen sprake van een ernstig klimaatprobleem, maar is een toename van CO₂ in de atmosfeer desondanks ongewenst. Volgens hem is de transitie naar een koolstofarme samenleving mogelijk door middel van een koolstofbelasting. Verder mitigatiebeleid is wat hem betreft zinloos. Overigens lijkt een koolstofbelasting hem politiek gezien niet haalbaar.

Volgens Schipper is mitigatie noodzakelijk en de enig mogelijke en juiste oplossing voor het klimaatprobleem. De meeste geïnterviewden zien mitigatiebeleid als noodzakelijk, ze hebben alleen weinig vertrouwen in de daadwerkelijke uitvoering hiervan. Zoals Schuiling zegt: er wordt te veel gepraat en er gebeurt te weinig. Volgens Rooijers en Bles is het vanuit technologisch opzicht mogelijk om de opwarming van de aarde onder de twee graden-grens te houden, maar vanuit sociaalmaatschappelijk oogpunt lijkt hen dit niet realiseerbaar.

Ook De Gans, Knops, Schöne, Simons, Van Vuuren en Wit zijn niet positief over de rol van de politiek in mitigatiebeleid. Om de opwarming te beperken tot twee graden zijn volgens Van Vuuren omvangrijke emissiereducties nodig. Hoewel die in technologisch en economisch opzicht haalbaar zijn, ziet hij nog geen politieke pogingen ontstaan om deze CO₂-reducties voor elkaar te krijgen. Hij ziet overigens meer in een technologische oplossing dan in gedragsverandering. Ook Duyvendak, zelf oud-politicus, acht het technologisch mogelijk om binnen de twee graden-grens te blijven, maar politiek gezien niet. Volgens Wit zou het van goed risicomanagement getuigen om nu fors te investeren in mitigatiemaatregelen, omdat deze maatregelen zichzelf terugverdienen. Simons wijst erop dat het bedrijfsleven actiever is dan de overheid. Schöne zegt dat er door allerlei factoren weinig actie ondernomen wordt. Zo bestaat er volgens hem weinig draagvlak voor klimaatbeleid in de VS.

Vellinga is aanmerkelijk positiever over mitigatiescenario's. Hij acht het waarschijnlijk dat we rond 2050 nog maar twintig procent van onze huidige CO₂-emissie uitstoten. Door geopolitieke spanningen zal het gebruik van fossiele brandstoffen afnemen. Duurzame energie als zonne-energie is minder risicovol en aantrekkelijker. Hoewel de politiek nog op de rem staat, ziet hij vanuit de samenleving veel initiatieven ontstaan. De eerste één à twee graden temperatuurstijging kunnen we volgens Vellinga nog overzien met behulp van adaptatiemaatregelen. Dit is wat hem betreft echter geen oplossing voor de lange termijn.

Simons geeft aan dat ook adaptatie noodzakelijk blijft, omdat de opwarming ook zal doorzetten als mitigatie plaatsvindt. Ook volgens Wit krijgen we noodgedwongen te maken met adaptatie in brede zin. Hieronder verstaat hij niet alleen maatregelen als het verhogen van de dijken, maar ook het instellen van een tijdelijk vangnet met vormen van klimaatengineering. Oude Boerrigter en Barendrecht wijzen op de mogelijkheden van adaptatiemaatregelen op lokale schaal. Hier bestaat wat hen betreft nog onvoldoende oog voor.

3.4.4 Houding ten aanzien van Carbon Dioxide Removal

De geïnterviewden is gevraagd hoe zij tegenover klimaatengineering staan als derde oplossingsstrategie. Te beginnen met het CDR-cluster aan technologieën. Er blijkt onduidelijkheid te bestaan over de begrippen klimaatengineering en CDR, en welke toepassingen daar nu wel of niet onder vallen. Met name (her)bebossing en BECCS kunnen volgens sommige geïnterviewden onder mitigatie worden geschaard; ze kunnen worden toegepast om aan het eind van deze eeuw negatieve emissies tot stand te brengen.

Schipper van Greenpeace is voorstander van (her)bebossing, maar ziet dit als een vorm van mitigatie en niet als een vorm van klimaatengineering. Ook Vellinga en Van Vuuren zijn positief over (her)bebossing, wat zij net als BECCS als een vorm van mitigatie beschouwen. Volgens Van Vuuren kunnen zowel BECCS als herbebossing worden toegepast om aan het einde van deze eeuw negatieve emissies te realiseren. Vellinga merkt ook op dat CDR-technologieën in het algemeen binnen nationale grenzen kunnen worden toegepast, zonder andere landen schade te berokkenen. Hoewel hij de toepassing duur en traag vindt, heeft Crok weinig bezwaar tegen CDR; hij zou een bescheiden financiering van bijvoorbeeld onderzoek naar olivijn door de overheid best interessant vinden. Schöne ziet CDR niet als iets fundamenteel anders dan mitigatie. Volgens hem is onderzoek nodig om de mogelijkheden van CDR in kaart te brengen.

Schuilings doet onderzoek naar olivijn en is een sterke voorstander van de toepassing hiervan, eventueel in combinatie met biochar. De meningen over olivijn blijken verdeeld. De toepassing lijkt Duyvendak weinig risicovol. De Baar, Vellinga en Van Vuuren zien echter niets in de olivijnoptie. Volgens hen vergt de toepassing ervan te veel energie in verhouding tot de CO₂-opbrengst.

Met StuuT is voornamelijk gesproken over de ijzerfertilisatie van oceanen. Volgens hem is het mogelijk hiermee de CO₂-concentratie in de atmosfeer te verlagen, maar moeten we eerst meer inzicht hebben in de consequenties ervan voordat we een besluit kunnen nemen over daadwerkelijke toepassing. Volgens De Baar (die er ook veel onderzoek naar deed) is de effectiviteit van ijzerfertilisatie waarschijnlijk erg laag. Als het wel zou werken, zou de toepassing risicovol kunnen zijn. Ook volgens Vellinga is toepassing niet effectief.

3.4.5 Houding ten aanzien van Solar Radiation Management

Geen van de geïnterviewden is positief over SRM. Iedereen spreekt allereerst over de risico's. Mede op basis van deze risico's wijzen Crok, Schipper, Schuiling, Vellinga en Van Vuuren SRM resoluut af. Schipper ziet SRM niet als oplossing voor de klimaatproblematiek, omdat het niets doet aan de uitstoot van broeikasgassen, de oorzaak van de opwarming van de aarde. Overigens is hij niet tegen *low tech*-vormen van SRM, zoals het wit verven van verharde oppervlakten, maar hij verwacht hier weinig heil van. Crok ziet geen noodzaak tot SRM, omdat de aarde volgens hem maar beperkt opwarmt en deze opwarming niet problematisch is. Vellinga wijst op de geopolitieke dimensie. Lokale toepassing van SRM kan regionale of globale gevolgen hebben. Hij acht het zeer onwaarschijnlijk dat landen wereldwijd in staat zullen zijn tot het maken van afspraken over regulering. Van Vuuren wijst expliciet op de risico's. Als we hem het vuur na aan de schenen leggen en vragen een keuze te maken tussen extreme klimaatscenario's en SRM, zegt hij dat de risico's van een opwarming van vijf graden waarschijnlijk groter zijn dan de risico's die gepaard gaan met toepassing van SRM. SRM zou daarmee een middel kunnen zijn om in het uiterste geval wat tijd te kopen om een extreem mitigatiescenario in werking te stellen. Hij is voorstander van verdere modelstudies naar SRM.

Ook Duyvendak, De Gans, Schöne, Simons en Wit gaan in op de risico's van SRM. Ze benadrukken de onzekerheden en het gebrek aan informatie over SRM en klimaatengineering in zijn algemeenheid. Hoewel ze zeker niet voor toepassing zijn, kunnen we volgens hen geen enkele mogelijkheid om klimaatverandering te beperken volledig uitsluiten.

Simons en Duyvendak noemen allebei een ethisch dilemma dat een rol speelt in het debat over SRM. Simons noemt het moral hazard-dilemma: het propageren van klimaatengineering kan het besef dat mitigatie urgent is, doen afnemen. Duyvendak wijst op het gevaar van toepassing van SRM uit kostenoverwegingen. Als de kosten van SRM lager zouden zijn dan die van strenge mitigatiemaatregelen, zou dit een oneigenlijke motivatie kunnen vormen om SRM toe te passen. Rooijers en Bles maken zich hier geen zorgen over. Volgens hen worden mensen zich juist bewust van de ernst van het klimaatprobleem door klimaatengineering als optie naar voren te schuiven. Ook Schöne is van mening dat aandacht voor klimaatengineering mensen wakker kan schudden.

Hoewel alle geïnterviewden zeer kritisch staan ten opzichte van SRM, wijst echter niemand deze mogelijkheid af om de reden dat het niet geoorloofd zou zijn om als mens technologieën toe te passen die dusdanig vergaand ingrijpen in de natuur. Dit principiële argument is door niemand genoemd.

3.5 Conclusie

Klimaatengineering staat de laatste jaren in toenemende mate in de belangstelling, zo bleek al uit onze analyse van beleids- en onderzoeksrapporten in hoofdstuk 2. Ook in de Engelstalige kwaliteitspers is het aantal artikelen over klimaatengineering sinds 2006 sterk gestegen. Het valt te verwachten dat de aandacht voor het onderwerp ook in Nederland zal groeien.

Gezien de complexiteit van het onderwerp en het top-down-karakter van veel van de technologieën, heeft klimaatengineering alle kenmerken van een *upstream technology* die voor controverse gaat zorgen. Dit geldt met name voor SRM. Desalniettemin is de breedte van het debat, zoals die gerepresenteerd wordt in de Engelstalige media, vooralsnog afwezig in Nederlandse klimaatkringen. Hoewel men zeer kritisch staat ten opzichte van SRM, wijzen slechts enkele geïnterviewden dit cluster aan technologieën ronduit af. Men noemt veeleer de risico's en onzekerheden, waarbij het ethische frame een belangrijke positie inneemt. Overigens wijst niemand SRM af om de principiële reden dat ingrijpen op het klimaatsysteem niet natuurlijk zou zijn. Sommige geïnterviewden geven hierbij aan dat we door onze grootschalige CO₂-uitstoot al op een niet-natuurlijke wijze op het klimaatsysteem ingrijpen.

Redenerend vanuit het noodscenario- of catastrofe-frame kan de toepassing van klimaatengineering, in het bijzonder SRM, niet worden uitgesloten. Dit denkframe speelt een belangrijke rol in het debat over klimaatengineering. Verschillende geïnterviewden zijn van mening dat geen enkele optie om klimaatverandering te beperken op voorhand mag worden uitgesloten. De risico's en effecten van klimaatengineering kunnen immers beperkter van aard zijn dan de risico's en effecten van een extreme klimaatverandering. De mogelijk noodzakelijke toepassing van SRM in de toekomst werkt als consensusargument om er (meer) onderzoek naar te doen. Het noodscenario-frame legitimeert dus verder onderzoek: meer kennis is vereist voor men zich überhaupt gefundeerd kan uitspreken over de noodzaak tot en de risico's van SRM. Een Nederlands onderzoeksprogramma naar SRM wordt echter niet als zinvol gezien.

Klimaatverandering wordt door de geïnterviewden als een groot en ernstig probleem ervaren; iedereen vindt mitigatie- en adaptatiemaatregelen noodzakelijk. Er bestaat echter weinig vertrouwen in de daadkracht van de politiek om deze maatregelen snel en effectief in te zetten. Tegelijkertijd wordt SRM niet gezien als oplossing voor het klimaatprobleem. SRM kan mitigatie niet vervangen; de noodzaak hiertoe blijft bestaan.

Hoe groter de perceptie van de ernst van het klimaatprobleem en hoe minder vertrouwen men heeft in het welslagen van het mitigatiebeleid, hoe eerder men geneigd is SRM in geval van nood te accepteren. We zien dat de geïnterviewde klimaatwetenschappers negatiever staan tegenover klimaatengineering dan andere geïnterviewden. Zij geven aan dat mitigatie, ook al ligt het politiek gecompliceerd, nog steeds mogelijk is. Wellicht bestaat er onder klimaatwetenschappers een groter vertrouwen in de oplossing van het klimaatprobleem door middel van mitigatie en adaptatie, los van de sociaal-maatschappelijke context waarin deze technologische maatregelen moeten worden toegepast.

CDR is veel minder omstreden dan SRM, onder het motto 'baat het niet, dan schaadt het niet'. (Uitgezonderd ijzerfertilisatie van oceanen; hierover zijn de meningen verdeeld.) Er is een breed draagvlak voor onderzoek naar CDR. Wel wordt getwijfeld aan de effectiviteit ervan. In dit kader worden genoemd: het trage tempo waarin CDR effect zou hebben, de hoge kosten ervan en de grote hoeveelheid energie die ervoor nodig is. Er bestaat onduidelijkheid over het onderscheid tussen mitigatie en CDR, zo bleek ook uit hoofdstuk 2. CDR wordt niet altijd als een vorm van klimaatengineering gezien, maar als vorm van mitigatie. Er bestaat met name verwarring over CDR-technologieën als (her) bebossing en BECCS, waarvan de afzonderlijke onderdelen ook onder mitigatie geschaard kunnen worden. Om het debat zuiverder te kunnen voeren, is meer helderheid nodig over de term klimaatengineering en over de verschillende soorten technologie die hier al dan niet onder verstaan worden.

Er bestaat vrees voor het optreden van het moral hazard-effect. Klimaatengineering kan zowel volgens geconsulteerde burgers als volgens onze geïnterviewden nooit worden ingezet ter vervanging van mitigatie en adaptatie. Echter, we zien dit moral hazard-effect zelf niet optreden. Geen van de geïnterviewden is van mening dat klimaatengineering mitigatie kan vervangen; de noodzaak tot mitigatie blijft bestaan. Wel kan de discussie over klimaatengineering volgens bijvoorbeeld Sible Schöne de aandacht voor klimaatverandering aanjagen.

Vooralsnog is het maatschappelijke debat in Nederland over klimaatengineering zeer beperkt, net als de framing van het onderwerp door stakeholders in het klimaatdebat. Het onderwerp is binnen de klimaatwereld vooralsnog geen onderwerp van discussie, deels door de onbekendheid met het onderwerp en deels door het gebrek aan inzicht in de mogelijkheden en effectiviteit van de verschillende opties. Verwacht mag worden dat dit debat zich wel gaat ontwikkelen. De kans is groot dat het debat in eerste instantie over de technologische kanten van het onderwerp gaat. Dit strookt met de vraag om meer informatie en met het pleidooi voor meer onderzoek. Naarmate het onderwerp bekender wordt, zal het debat zich verbreden, en zullen meer maatschappelijke onderwerpen aan de orde komen. Daarbij gaat het niet alleen om onderwerpen van

ethische aard, maar ook om bijvoorbeeld de governance van klimaatengineering. Het is verstandig deze maatschappelijke discussie te voeren in de context van de brede klimaatdiscussie, inclusief aandacht voor de noodzaak tot mitigatie en adaptatie. Klimaatengineering wordt niet gezien als vervanging van beide strategieën.

Hierna volgen de afzonderlijke verslagen van de interviews met stakeholders in het Nederlandse klimaatdebat. De volgorde is alfabetisch op achternaam. De interviews met CE Delft (Frans Rooijers en Mart Bles) en IUCN (Henk Simons) zijn afgenomen door Samantha Scholte. Alle overige interviews zijn afgenomen door Monique Riphagen.

Interviews

met stakeholders
in het Nederlandse
klimaatdebat



Hein de Baar, oceanograaf

"IJzerfertilisatie is niet efficiënt"

Hein de Baar is hoogleraar oceanografie aan de Rijksuniversiteit Groningen en werkzaam bij het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ). De Baar is opgeleid als chemisch ingenieur aan de Technische Universiteit Delft. Geïnspireerd door de milieubeweging in de jaren zeventig deed hij zijn afstudeeronderzoek aan het NIOZ op Texel. Hoewel hij fundamenteel onderzoek doet, is hij van oorsprong zeer geïnteresseerd in milieuonderzoek.

Hein de Baar doet onderzoek naar de opname van CO₂ door oceanen en de beperkende rol van spoorelementen, waarvan ijzer een van de belangrijkste is. Zijn belangstelling betreft de werking van het ecosysteem. Is ijzer inderdaad de beperkende factor in de groei van algen of spelen andere factoren hierin ook een rol, bijvoorbeeld een gebrek aan licht? Dit type onderzoek staat de laatste jaren sterk in de belangstelling, omdat grootschalige bemesting van oceanen met ijzer volgens sommige wetenschappers dusdanig veel CO₂ kan vastleggen dat het de temperatuur op aarde kan doen dalen. IJzerfertilisatie is daarmee een vorm van klimaatengineering.

Het eerste experiment op dit gebied werd in 1987 uitgevoerd door John Martin, wat begin 1988 resulteerde in de eerste publicatie op dit gebied. Sinds zijn schertsende uitspraak 'Give me a half tanker of iron, and I will give you an ice age' staat dit type onderzoek volgens De Baar sterk in de belangstelling.

De Baar voerde zijn eerste experiment op dit gebied uit in 1988: hij voegde ijzer toe aan flessen zeewater. Onder deze gecontroleerde omstandigheden bleek dat het toevoegen van ijzer inderdaad tot een toename van algen leidde. Om te onderzoeken of dit effect ook plaatsvond in de open oceaan, deed hij hierna een experiment met de bemesting van vijftig vierkante kilometer zeewater. Na acht van zulke experimenten schreef De Baar in 2005 een syntheseartikel over de efficiëntie van ijzerfertilisatie.

Het eerste idee was dat één ijzeratoom 500 duizend atomen CO₂ uit de lucht zou halen. Dit bleken er echter hooguit 25 duizend te zijn, een factor twintig minder. Als ijzerfertilisatie grootschalig zou worden toegepast, is het effect waarschijnlijk nog veel kleiner. Vanuit efficiency-overwegingen pleit De Baar dan ook tegen ijzerfertilisatie als vorm van klimaatengineering.

Hij legt uit hoe het principe van ijzerfertilisatie werkt: na de bemesting van de oceanen met ijzer vindt er een algenbloei plaats. Deze algen worden vervolgens opgegeten door specifieke organismen. De poepjes hiervan komen vrij en



vallen naar beneden. De organismen zelf gaan dood, waarna de in de organismen opgeslagen CO_2 weer vrijkomt. Van de CO_2 die wordt opgeslagen als C belandt slechts een paar procent op de zeebodem. Als voorbeeld: van duizend gram organische stof valt bijvoorbeeld vijf procent naar beneden; vijftig gram. Onderweg wordt dit afgebroken, waardoor er op honderd meter diepte nog maar vijf gram over is en op drie kilometer diepte bijvoorbeeld nog maar twee gram (willekeurig gekozen hoeveelheden).

Ook is er sprake van circulatie in de diepe wateren van de oceanen. Dit betekent dat de vastgelegde CO_2 uiteindelijk weer aan de oppervlakte komt. Dit kan even duren, op geringere dieptes twintig tot dertig jaar en in diepere oceanen misschien honderd tot vierhonderd jaar of langer, maar uiteindelijk komt de CO_2 weer in de atmosfeer. Op zijn best kopen we dus wat tijd om andere maatregelen te nemen om klimaatverandering te beperken. In 2004 heeft een experiment genaamd Eifex plaatsgevonden. *Nature* heeft hier in 2012 een artikel over gepubliceerd, waarbij wel een export van koolstof naar de diepzeebodem werd aangetoond. Er bestaat dus nog wetenschappelijk debat over de effectiviteit van ijzerfertilisatie.

Gevraagd naar zijn bredere opinie over klimaatengineering zegt De Baar dat we al een aantal milieuproblemen hebben opgelost, denk aan de vervuiling uit de jaren zestig, maar dat CO_2 het laatste grote milieuvraagstuk is. Hij geeft aan toch een echte technoloog te zijn: we moeten oplossingsstrategieën toepassen waarbij we het proces goed kunnen controleren in gesloten systemen met behulp van goed controleerbare meet- en regelsystemen. Klimaatengineering zou worden toegepast in een open systeem, namelijk het klimaatstelsel waarbij we alle variabelen niet inzichtelijk hebben. Dit levert grote risico's op. Als een en ander uit de hand loopt, is dit niet meer te controleren.

Het uit de lucht halen van CO_2 en ondergronds opslaan is volgens De Baar niet problematisch, omdat je hierbij gebruik maakt van een gesloten systeem. De opslag van CO_2 door middel van de verwerking van olivijn is volgens hem ook niet problematisch (je maakt gebruik van een natuurlijk proces), maar evenmin is het effectief, omdat het een langdurig proces is. Je kunt dat versnellen, maar dit kost weer energie. Om deze reden heeft Shell volgens De Baar de betrokkenheid bij experimenten gestopt. Op zee is het ook niet effectief.

Waarschijnlijk kan de ijzerfertilisatie van oceanen niet zoveel kwaad, omdat de effectiviteit vrij gering is, zoals De Baar eerder heeft aangegeven. Stel echter dat het wel werkt. De algengroei zorgt dan voor een gebrek aan stikstof en fosfor, waardoor deze meststoffen uit andere delen van de oceanen agetrokken kunnen worden en er daar een tekort aan ontstaat. Dit kan een verschuiving van de biologische productie tot gevolg hebben. Ook zouden bepaalde diatomeeën (kiezelwieren) gestimuleerd kunnen worden die hierop

bepaalde giftige zuren kunnen gaan afscheiden. Hiermee zou je een plaagalg kunnen creëren.

De Baar is echter niet tegen het uitvoeren van bemestingsexperimenten. In 2009 vond op initiatief van het Duitse Ministerie van Wetenschap het Duits-Indiase experiment LOHAFEX plaats. De Canadese ngo ETC Group was hier fel op tegen, de Duitse minister van Milieu daarna ook. Dit was volgens De Baar echter een onschuldig experiment, dat geen risico met zich meebracht. Uit dit voorbeeld blijkt dat de framing van fundamenteel onderzoek als onderzoek naar klimaatengineering wel reputatieschade kan veroorzaken. Het vertrouwen in wetenschappelijk onderzoek wordt ook niet echt bevorderd door entrepreneurs als Russ George, een Amerikaan die een experiment met ijzerfertilisatie heeft uitgevoerd voor de westkust van Canada. Het is onduidelijk of dit daadwerkelijk tot wetenschappelijke resultaten leidt.

Terugkomend op klimaatengineering in brede zin is De Baar van mening dat alle vormen van klimaatengineering afleiden van mitigatie, en daarmee van het echte klimaatprobleem. Onderzoek naar klimaatengineering werkt volgens hem vertragend. Het geld en vooral de aandacht die beschikbaar zijn voor klimaatengineering zijn niet beschikbaar voor mitigatie.

Het enige wat we kunnen doen aan het klimaatprobleem is het terugdringen van de CO₂-uitstoot. Technisch is dit mogelijk. Het verbeteren van de energie-efficiëntie is het gemakkelijkst, dit is door heffingen en dergelijke te sturen. Om te voorkomen dat de opwarming van de aarde een gevaarlijk punt bereikt, moeten we in 2050 nul procent CO₂ uitstoten. Dit kan door nu grootschalig alle CO₂-neutrale technologie uit te rollen. Wereldwijd zou dit twee à drie procent van het BNP kosten, wat nog te doen is.

Gevraagd naar de ernst van de opwarming van de aarde, geeft De Baar aan dat de gemeten CO₂-stijging erg hard gaat. Ook gemeten naar de hoeveelheid Arctisch zeeijs gaat de opwarming snel, mede doordat de opwarming aan de polen het snelste verloopt. Ook het afsmelten van een deel van de Groenlandse ijskap is zorgwekkend. Het koelen van Groenland, zoals sommige wetenschappers en bijvoorbeeld de Arctic Methane Emergency Group voorstellen, leidt volgens De Baar echter ook weer af van de hoofdplicht: het verminderen van de uitstoot van CO₂.

Marcel Crok, freelance wetenschapsjournalist

“Geen noodzaak voor een plan B”

Marcel Crok – afgestudeerd chemicus – is een freelance wetenschapsjournalist en staat bekend als klimaatscepticus. Hij is het klimaatdebat ingerold door het schrijven van een kritisch artikel over de zogenoemde hockeystick: een bekende temperatuur-reconstructie van het noordelijk halfrond over de afgelopen duizend jaar, die vaak wordt gebruikt als bewijs voor de antropogene invloed op het klimaat. Hij is een van de reviewers van het laatste IPCC-rapport.

Marcel Crok noemt zichzelf geen klimaatscepticus, maar is wel kritisch over de klimaatwetenschap. ‘Er is binnen de klimaatwetenschap geen ruimte voor kritiek, en dat doet de geloofwaardigheid van kennis over het klimaat geen goed. De bewijsvoering voor antropogene klimaatverandering is een kaartenhuis dat op drijfzand staat.’ Een causaal verband tussen stijgende CO₂-emissies en opwarming van de aarde acht Crok onvoldoende bewezen, omdat de rol van andere factoren – zoals de zon – vaak wordt genegeerd.

In 2009 lag het IPCC onder vuur nadat er e-mails van klimaatwetenschappers naar buiten waren gekomen, waaruit bleek dat er selectief met onderzoeksresultaten werd omgesprongen. Sinds Climategate is er volgens Crok niets veranderd in de klimaatwetenschap, al is er wel meer interactie ontstaan tussen klimaatwetenschappers en -sceptici. Crok is door (inmiddels oud-)staatssecretaris van milieu Joop Atsma benaderd om een kritische blik te werpen op het laatste IPCC-rapport. Hij is blij dat de overheid nu eindelijk een scepticus heeft gevraagd om het IPCC-rapport te reviewen. Inmiddels heeft hij al commentaar geleverd op de eerste versie en is hij erg benieuwd wat hiermee zal gebeuren. Door de samenwerking met de overheid heeft Crok het gevoel dat het IPCC zijn kritiek niet zomaar naast zich neer kan leggen, maar erg overtuigd is hij daar nog niet van.

De urgentie van het klimaatprobleem is Crok onduidelijk. ‘We hebben genoeg tijd om verder onderzoek te doen naar klimaatverandering. Het effect van CO₂ lijkt mee te vallen, de temperatuurstijging is heel beperkt. De opwarming van de aarde is een vraagstuk met veel onzekerheden, maar de manier waarop mainstream klimaatwetenschappers met deze onzekerheden omgaan is onjuist. Er wordt gezegd dat we niets uit kunnen sluiten en daarom maar beter van het voorzorgprincipe uit kunnen gaan. Op deze manier ontstaan er doemscenario’s en wordt er een klimaatbeleid doorgedrukt dat wellicht onnodig of onwenselijk is.’





Een oplossing zoeken voor de 'klimaatcrisis' is volgens Crok de verkeerde insteek, vanwege de onzekerheid over de aard en omvang van het probleem. 'Je kunt wel zeggen dat de toename van CO₂ ongewenst is, en dat we graag toewerken naar een nog schonere lucht. Maar daar is helemaal geen klimaatbeleid voor nodig.'

Milieueconoom Richard Tol stelt een geleidelijk oplopende koolstofbelasting voor, die laag begint en later opgevoerd wordt. 'Op die manier zouden we een transitie naar een gedecarboniseerde samenleving kunnen bewerkstelligen. De overheid zou hier een kleine rol in spelen, het is vooral het bedrijfsleven dat hier de aanzet toe zou kunnen geven. Een logische en vrij simpele oplossing, helaas gelimiteerd doordat het politiek onhaalbaar lijkt.' Gezien de beperkte opwarming van de aarde, pleit Crok voor het afschaffen van het mitigatiebeleid. 'We kunnen ons beter gaan richten op adaptatie. Menselijke oorzaak of niet: die overstromingen in Bangladesh gaan er toch wel komen, dus waarom zouden we ons daar niet op voorbereiden?'

In 2009 schreef Crok een artikel over klimaatengineering voor het tijdschrift *Natuurwetenschap & technologie*. Hiervoor heeft hij zich in de discussie over klimaatengineering verdiept. Zijn commentaar is gematigd: 'Ik vind het een oninteressant onderwerp, de dreiging van klimaatverandering is niet al te groot, we hebben geen haast met het nemen van maatregelen: er is dus helemaal geen noodzaak voor een plan B.' Erg veel zin om over klimaatengineering te spreken heeft Crok dus niet, hij vindt dat we ons wel op belangrijkere dingen kunnen richten. Evenmin is hij geïnteresseerd in een maatschappelijke discussie over dit onderwerp.

Crok vindt wetenschappelijk onderzoek naar klimaatengineering prima, zolang het in het kader valt van het vergaren van kennis over het klimaat. 'Hier zit een synergie waar we gebruik van kunnen maken.' Kleinschalig onderzoek omwille van het onderzoek kan geen kwaad, grootschalig onderzoek wel. Crok pakt *The Climate Fix* van Robert Pielke Jr. erbij, en wijst op Pielkes punt: we begrijpen nog te weinig van het klimaatstelsel, en kunnen dus niet zomaar met klimaatengineering beginnen. Hiermee doelt hij vooral op de SRM-technologieën, en hij waarschuwt voor grootschalige experimenten.

Tegen CDR heeft Crok geen bezwaar, hoewel hij de toepassing hiervan beoordeelt als 'duur en traag'. Nederland zou een bescheiden beleid kunnen voeren door onderzoek naar CDR te financieren. 'Een wetenschapper als Schilling doet onderzoek naar de verwerking van olivijn, waarom zouden we dat niet financieren?'

Crok gaat ervan uit dat decarbonisatie van de economie momenteel niet mogelijk is, omdat de technologie hiervoor nog niet bestaat. Gelukkig hebben we de tijd om die te ontwikkelen: daar zouden we in kunnen investeren. Crok

vertrouwt erop dat dit grotendeels door de markt zelf geregeld kan worden. 'Energie is een kostenpost, we willen dat energie zuiniger en goedkoper wordt.'

De discussie over klimaatengineering leeft niet onder klimaatsceptici. 'Het huidige debat over klimaatengineering is voornamelijk een roep om naamsbekendheid van een kleine groep klimaatwetenschappers. Door het onderwerp een grote urgentie te geven, hopen wetenschappers hun onderzoek te kunnen financieren. Meer valt er eigenlijk niet over te zeggen.'



Wijnand Duyvendak, klimaatpublicist

"Geen principieel taboe op klimaatengineering"

Wijnand Duyvendak was van 2002 tot 2007 Tweede Kamerlid voor GroenLinks. Tegenwoordig is hij directeur van Triple Turnaround, een project- en adviesbureau voor maatschappelijke initiatieven. Duyvendak is publicist over groene politiek en de opwarming van de aarde.

Wijnand Duyvendak ziet de opwarming van de aarde als een groot en serieus probleem, waarbij tijd een belangrijk pijnpunt is. 'Hoe langer je wacht met het nemen van maatregelen, hoe lastiger die te realiseren zijn en hoe hoger de kosten zullen uitvallen. Het is dus verstandig op tijd de nodige maatregelen te nemen.' Op korte termijn zal klimaatverandering in Nederland geen groot probleem vormen. 'Onze kinderen krijgen hier echter wel mee te maken, en ook in ontwikkelingslanden is klimaatverandering al aan de gang. Maatregelen om klimaatverandering te voorkomen zijn dus ook een zaak van rechtvaardigheid, internationaal en intergenerationeel.'

Technisch gezien is het volgens Duyvendak mogelijk om binnen de twee graden-grens te blijven, politiek gezien niet. 'Ik hoop dat er een versnelling in het politieke besluitvormingsproces optreedt, maar het lijkt me hoogst onwaarschijnlijk. Ik verwacht dat kantelpunten binnen tien tot dertig jaar bereikt zullen worden. Dat is politiek gezien een erg korte tijd.'

Wat mitigatiestrategieën betreft moeten we het volgens Duyvendak vooral hebben van energiebesparing. 'Daar valt nog veel winst te behalen, ook met behoud van comfort. Het vraagt wel om ingrijpende maatregelen, zoals het duurder maken van fossiele brandstoffen of het aanscherpen van normen. Dat ligt politiek gevoelig.'

Adaptatieprogramma's heeft Nederland al beter op orde. 'We hebben in Nederland genoeg geld voor adaptatiemaatregelen, in tegenstelling tot ontwikkelingslanden.'

Duyvendak is al enige jaren bekend met het thema klimaatengineering. 'Aanvankelijk zag ik klimaatengineering als een teken van onmacht. Nu vind ik het een interessant onderwerp, dat nadere bestudering verdient. De noodkreet van wetenschappers om door te gaan met onderzoek heeft indruk gemaakt.'



Het maakt hierbij wel uit om welke vorm van klimaatengineering het gaat. Een CDR-technologie zoals de toepassing van olivijn lijkt hem weinig risicovol, omdat je precies weet wat je doet. Voor SRM-technologieën ligt dat anders. 'Als SRM goedkoper is dan mitigatie, zou uit kostenoverwegingen voor SRM gekozen kunnen worden. Dat is link als je niet weet hoe zo'n ingreep uitwerkt op het klimaatsysteem. Het is ook weer niet de bedoeling om een nieuwe ijstijd te creëren.'

Ondanks de risico's die er aan SRM verbonden zijn, is Duyvendak voorstander van een open discussie. 'Er is een relatie met de ernst van het probleem. Als we echt naar de zes graden opwarming gaan, moeten we misschien een gecalculeerde gok nemen. Maar het blijft een gok.'

Verder onderzoek is noodzakelijk, allereerst naar de weinig risicovolle vormen van klimaatengineering. 'Later kunnen ook de meer risicovolle vormen aan bod komen, maar er moet geen geld gaan naar de extreme *high tech*-oplossingen. Dat maakt het risico kleiner dat ze worden toegepast.'

Het is volgens Duyvendak te vroeg om klimaatengineering te commercialiseren; er moeten in dit stadium geen *carbon credits* aan worden toegekend. Het onderzoek moet gewoon worden betaald uit onderzoeksgelden. Ook financiering door filantropen als Bill Gates of Richard Branson vindt hij geen probleem.

De ontwikkeling en eventuele toepassing van klimaatengineering moet wel gereguleerd worden. Hoe moeilijk of makkelijk dat proces zal verlopen, zal van de ontwikkeling van de technologie afhangen: 'Over het algemeen geldt dat afspraken makkelijker tot stand komen als de technologie ofwel heel veilig is, ofwel heel extreem. Als we met klimaatverandering in extreme scenario's belanden, zal het gemakkelijker worden om afspraken te maken.'

Omdat klimaatengineering nog zo futuristisch is, 'een rariteitenkabinet', landt de maatschappelijke discussie vooralsnog niet. 'Dat zal veranderen als een paar technologieën inderdaad blijken te werken. Het zal de discussie over klimaatverandering nog complexer maken, maar dit is een *fact of life*. Als je een goede discussie van de grond wilt krijgen, moet je in elk geval niet polariseren, of het onderwerp taboe verklaren.'



Gert de Gans, klimaatspecialist ICCO

“Kiezen tussen twee kwaden”

Gert de Gans is programmaspecialist Klimaat bij ICCO. Deze ontwikkelingsorganisatie wil bijdragen aan armoedebestrijding door het bevorderen van zelfredzaamheid.

Volgens Gert de Gans is het klimaatvraagstuk gekoppeld aan, of veroorzaakt door, de welvaartsgroei in rijke landen. ‘De armsten dragen niet bij aan het probleem, want zij stoten amper CO₂ uit, maar zij dragen wel de gevolgen ervan.’ Klimaatverandering kan door weersveranderingen tot voedseltekorten in arme landen leiden, of bijvoorbeeld tot overstromingen.

Volgens De Gans kan de aarde een bepaalde hoeveelheid CO₂ zelf opnemen, in de *global commons*. Bij een gelijke verdeling hiervan zou iedereen recht hebben op een voetafdruk van twee ton CO₂ per persoon per jaar. De rijke landen zitten hier fors boven, tot wel tien ton, en de armste landen zitten er ver onder. ICCO werkt aan een bewustwordingsprogramma in Nederland waarmee de organisatie onze leefstijl wil beïnvloeden, de verkoop van duurzame energie wil stimuleren en *carbon credits* wil verkopen. ‘Het idee hierachter is dat de rijken en de armen een gemeenschappelijk probleem hebben, waarvan het prijskaartje bij de rijken thuishoort.’

Als het gaat over de ernst van de klimaatproblematiek verwacht De Gans dat we niet onder de grens van twee graden blijven. De politiek is tot nu toe volgens hem niet bij machte geweest om tot een oplossing te komen. Wie weet wat er gaat gebeuren als de zogenoemde *tipping points* eenmaal gepasseerd worden, als bijvoorbeeld de permafrost in Rusland ontdooit en grote hoeveelheden methaan vrijkomen, een sterk broeikasgas.

De Gans denkt dat de klimaatverandering nog beperkt zou kunnen worden als we alle beschikbare middelen zouden inzetten. Hij heeft echter weinig vertrouwen in mitigatiemaatregelen. Het Kyoto-protocol is maar door weinig landen ondertekend en fossiele brandstoffen vertegenwoordigen een te groot economisch belang. ICCO zet met name in op adaptatie. ‘Het klimaat verandert, buitenlandse partners geven ook aan dat ze dit ervaren, en we moeten ons hieraan aanpassen.’ Om dit mogelijk te maken, moet het internationale adaptatiefonds worden gevuld. Volgens De Gans loopt men hierbij achter op de afspraken die hierover zijn gemaakt.



Wat klimaatengineering betreft, is de hoofdvraag of we deze technologieën voldoende in de greep hebben als we ze gaan toepassen: 'Er is veel onzekerheid over de gevolgen van dit soort maatregelen en ik vind het erg lastig in te schatten wat de effecten en bijeffecten zullen zijn. Daarom ben ik erg terughoudend. Aan de andere kant komt het misschien zover dat we tussen twee kwaden moeten kiezen: klimaatverandering of klimaatengineering.'

De Gans gaat ervan uit dat ontwikkelingslanden erg kritisch zullen zijn over klimaatengineering. 'Ik verwacht dat ze ons zullen verwijten dat we een makkelijke uitweg zoeken omdat we onze CO₂-voetafdruk niet willen verlagen.' Uit eigen ervaring weet De Gans dat overheden van ontwikkelingslanden vaak wat pragmatischer in de discussie staan dan het maatschappelijk middenveld. 'Het maatschappelijk middenveld is vaak kritischer en idealistischer en zal minder snel een economische afweging maken.'

De Gans vindt het 'prima' om onderzoek te laten uitvoeren naar klimaatengineering. Wel vindt hij dat er enige vorm van regulering zou moeten zijn. Als besloten zou worden tot toepassing, zou dit volgens hem ook internationaal gereguleerd moeten worden. 'Ontwikkelingslanden zijn nu slecht geïnformeerd in de klimaatonderhandelingen. Er wordt weinig naar ze geluisterd, de BRIC-landen bepalen de agenda namens de zich ontwikkelende landen. Als er over klimaatengineering onderhandeld wordt, moeten de ontwikkelingslanden hier een stem in krijgen.' Dit betekent in ieder geval transparantie en kennisoverdracht van de westerse naar de ontwikkelingslanden.

De Gans heeft veel reserves over de wijze waarop hij verwacht dat CDR zal worden vormgegeven. 'Het is natuurlijk mogelijk om hier *carbon credits* voor te gaan uitgeven, zolang de opbrengsten maar terugvloeien naar de armsten in ontwikkelingslanden. Zij krijgen de grootste gevolgen van klimaatgevolgen op hun bord.'

Klimaatengineering is als onderwerp (nog) nooit opgekomen in de contacten die De Gans heeft met de partners van ICCO in de zuidelijke landen. Desalniettemin verwacht hij wel maatschappelijke discussie over de technologie, net als bij andere technologieën als genetisch gemodificeerde organismen. Dit is volgens De Gans ook niet zo gek: er zijn veel onzekerheden, de effecten op ecosystemen en mensen wereldwijd kunnen groot zijn, en er bestaat het risico op moral hazard: de politiek kan een economische afweging maken en kiezen voor de goedkopere oplossing.

Pol Knops, Innovation Concepts

“Versnelde verwerking van olivijn wel degelijk rendabel”

Pol Knops is natuurkundige en mede-eigenaar van Innovation Concepts B.V., een tweemansbedrijf in duurzame ontwikkelingen (producten, processen en concepten voor het vastleggen van CO₂). Innovation Concepts doet onder andere onderzoek op het gebied van de versnelde verwerking van mineralen als olivijn. Pol Knops doet promotieonderzoek aan de Katholieke Universiteit Leuven.

Pol Knops gelooft niet dat de grens van maximaal twee graden temperatuurstijging nog haalbaar is. ‘De politiek blijft praten, maar uiteindelijk gebeurt er niets. De vraag is daarom niet of de temperatuurstijging onder de twee graden blijft, maar of het vier of zes graden warmer wordt.’ Om de opwarming nog enigszins binnen de perken te houden, zouden we vol moeten inzetten op alle mogelijke beleidsopties. Echter, biobrandstoffen komen niet van de grond, net zomin als CCS. Burgers willen geen windmolens en ook nucleaire energie heeft nadelen. ‘Als we nog tien jaar wachten, waar sommige economen voor pleiten omdat hernieuwbare energie over tien jaar vast goedkoper is, gebeurt er nog tien jaar niets.’ De binding van CO₂ door de verwerking van olivijn is volgens Knops een goede aanvulling op de al bestaande mitigatiemaatregelen.

Knops legt uit hoe het natuurlijke proces in zijn werk gaat. In totaal is 99,94 procent van alle koolstof vastgelegd als ‘dode’ (=inerte) koolstof in de aardkorst en bevindt er zich 0,06 procent ‘actieve’ koolstof in de atmosfeer, in biomassa, in oceanen en in turf, veen et cetera. Door vulkaanuitbarstingen komt de CO₂ uit de aardkorst in de atmosfeer terecht. Vervolgens wordt het geleidelijk weer opgenomen door de verwerking van mineralen als olivijn.

Olivijn is basisch. Door een reactie met het zure CO₂ wordt bicarbonaat gevormd en CO₂ vastgelegd, een proces waarbij energie vrijkomt. Doordat we sinds het begin van de industriële revolutie grote hoeveelheden organisch koolstof in de vorm van fossiele brandstoffen hebben verstoekt waarbij CO₂ vrijkwam, is de concentratie aan CO₂ in de atmosfeer sterk gestegen, te sterk om te worden gecompenseerd door het natuurlijk verweringsproces. Dit verloopt namelijk erg langzaam. Het kan echter een handje worden geholpen. Door olivijn te vermalen, de pH-waarde te verlagen en de druk waaronder het verweringsproces plaatsvindt te verhogen, verloopt het proces sneller. Innovation Concepts is bezig met de ontwikkeling van dit verbeterde verweringsproces (enhanced weathering). Hoewel vaak wordt gezegd dat het bewerken van olivijn te veel energie kost, is enhanced weathering volgens Knops wel degelijk rendabel.



Innovation Concepts werkt niet alleen aan enhanced weathering, maar ook aan het vastleggen van CO₂ door productvervanging. Olivijn komt als mineraal voor in gesteenten. Olivijnhoudend gesteente kan daarom worden toegepast als grind of zand, of het kan verwerkt worden in tuinaarde of potgrond. Omdat olivijn tot bicarbonaat verweert en magnesium afgeeft, verhoogt het tevens de pH-waarde van de bodem. Uitgestrooid of toegepast bindt het CO₂, waardoor het de CO₂-uitstoot kan compenseren. Knops noemt het bedrijf greenSand, dat deze producten levert aan zowel de consumentenmarkt als de professionele markt. Volgens greenSand kan met tien kilo van hun product 12,5 kilo CO₂ worden gecompenseerd. Knops: 'Consumenten willen zelf iets kunnen doen aan het klimaatprobleem. Olivijn biedt een mogelijkheid, naast energiebesparing en andere mitigatiemaatregelen.'

De toepassing van olivijn klinkt als een relatief eenvoudige en aantrekkelijke optie om klimaatverandering tegen te gaan. Waarom wordt het niet op grote schaal toegepast en vinden we niet in alle bouwmarkten en tuincentra zakken met olivijnzand en -tuinaarde?

'Er is nog weinig belangstelling voor olivijn. Wereldwijd zijn er sinds halverwege de jaren negentig zo'n vijftig personen gepromoveerd op het onderwerp. Er is dus wetenschappelijke belangstelling en kennis, maar de toepassing heeft nog een sterk hobbymatig karakter, wat de promotie ervan beperkt.'

Mogelijkheden zijn er volgens Knops echter volop. Er is, zoals ook in het interview met Olaf Schuiling naar voren kwam, voldoende olivijn om onze volledige CO₂-uitstoot te compenseren. Jaarlijks is er zeven kubieke kilometer nodig, zo'n 25 Gton. Deze hoeveelheid kan vergeleken worden met 's werelds grootste mijn en is hanteerbaar.

Knops geeft twee belangrijke belemmeringen aan in de toepassing van olivijn. Ten eerste is het commercieel niet aantrekkelijk. De CO₂-prijs is laag en er valt dus niets te verdienen met CO₂-emissiehandel. Dit is ook nog niet gecertificeerd. Opties om de CO₂-uitstoot te compenseren worden afgezet tegen de marktprijs van CO₂. Het ETS remt hierdoor in feite nieuwe ontwikkelingen. Ook zijn grote bedrijven niet geïnteresseerd in olivijn. Knops zegt verschillende grote bedrijven waaronder Essent, Nuon en Tata Steel te hebben gesproken, maar hier is geen commitment. De olivijn-optie wijkt af van de huidige bestaande mitigatiemaatregelen en past daarom niet in het bestaande plaatje. Volgens Knops hebben deze bedrijven geïnvesteerd in de afvang en ondergrondse opslag van CO₂ (CCS) en gaan ze voor deze optie (mits commercieel interessant).

De nadelen van olivijn worden volgens Knops eenzijdig bekeken, zo moet olivijn gedolven worden en eventueel vervoerd. Dit geldt net zo goed voor de kolen uit Australië of de VS die in onze kolencentrales worden verstoekt. Knops zegt dat de CCS-lobby in Nederland echter zo machtig is dat kleine bedrijven geen voet aan de grond krijgen. Ook de onderzoeksagenda wordt volgens hem bepaald door grote bedrijven als Shell, Nuon en Essent.



Ten tweede bestaan er beleidsmatige belemmeringen voor de toepassing van olivijn, met name als meststof. Er komen namelijk kleine hoeveelheden nikkel bij vrij, een metaal dat een lage achtergrondconcentratie heeft in de Nederlandse bodem, waardoor de wettelijke normen bij toepassing van olivijn al snel worden overtreden. Bodemmedewerkers zijn volgens Knops alleen geïnteresseerd in hun sectorale belang en zien olivijn niet graag toegepast worden. Knops verwijt de overheid dan ook een gebrek aan visie. Toch vinden er initiatieven plaats, zo is olivijnzand in Den Haag toegepast in een kerststal, wordt olivijnzand gebruikt in zandbakken van kinderdagverblijven en is ook Prorail in toepassing geïnteresseerd.

Gaan we hiermee de wereld redden?

‘Olivijn is een van de opties om klimaatverandering te voorkomen dan wel te beperken. We kunnen het ons niet veroorloven om opties te laten liggen. Het is geen vervanging van maatregelen als energiebesparing, CCS, zonnepanelen et cetera. Je moet olivijn inzetten en daarnaast ook al die andere maatregelen nemen.’

Zal de aandacht voor olivijn niet ten koste gaan van mitigatie?

‘Op mitigatievlak gebeurt er momenteel ook niet zoveel. Die discussie is een aantal jaren geleden trouwens ook gevoerd over adaptatie. Maar de toegenomen aandacht voor adaptatie heeft niet geleid tot minder aandacht voor mitigatie. Ik ben daar nu dus ook niet zo bang voor.’

Wat vind je ervan dat olivijn als een vorm van klimaatengineering wordt opgevat?

‘Het is jammer dat alle klimaatengineeringsopties op één hoop worden gooid en dat olivijn bijvoorbeeld gelijk wordt gesteld met spiegels in de ruimte. Dit is niet wenselijk en bevordert het debat niet. CDR-technologieën kunnen interessante opties zijn. Biochar kan bijvoorbeeld een vervanging vormen voor de huidige veenafravingen en de toepassing van BECCS past in het bestaande kader. SRM geeft eerder een perverse prikkel. Het is goedkoper en zorgt voor temperatuurverlaging, maar legt geen CO₂ vast en doet niets aan de verzuring van oceanen.’

Paul Oude Boerrigter en Joost Barendrecht, Grontmij

“Adaptatiemaatregel vooral populair als die meerdere doelen dient”

Grontmij is een advies- en ingenieursbureau met expertise op onder meer de gebieden energie, mobiliteit, duurzame gebouwen, gebiedsontwikkeling en water. Paul Oude Boerrigter is senior adviseur bodem bij Grontmij. Joost Barendrecht was ten tijde van het interview business development manager bij Grontmij. Tegenwoordig is hij zelfstandig adviseur bij Joost Barendrecht Duurzaam Advies.

Met het Deltaprogramma en kennisprogramma's als Klimaat voor Ruimte en Kennis voor Klimaat staat het inspelen op de gevolgen van klimaatverandering al een tijd op de agenda in Nederland. Volgens Oude Boerrigter en Barendrecht worden sommige gevolgen van klimaatverandering in Nederland echter onderschat, zoals gezondheidsproblemen in de vorm van hittestress. Ook de aandacht voor de gevolgen van klimaatverandering voor de landbouw en de voedselvoorziening is in Nederland nog maar van recente datum. Oude Boerrigter en Barendrecht trekken allebei projecten op het gebied van gebiedsontwikkeling waarbij adaptatie een rol speelt. Het is hun ervaring dat adaptatiemaatregelen snel sneuvelen in het beleid van (lagere) overheden, omdat ze nu eenmaal geld kosten. Omdat elke beslissing over gebiedsinrichting een beslissing voor de komende dertig jaar is zou vaker een langetermijnvisie ontwikkeld moeten worden bij de inrichting van een gebied.

Als het gaat om de rol die bodem en ondergrond hebben bij klimaatmaatregelen is positief dat het Rijk samen met provincies aan een structuurvisie werkt voor de diepe en ondiepe ondergrond. Als die visie er ligt, wordt het eenvoudiger om in te grijpen in de ondergrond, bijvoorbeeld voor de opslag van CO₂ (CCS), het boren naar schaliegas of duurzame energievoorzieningen als warmtekuudeopslag (wko). Ook is er het een en ander in beweging gezet bij gemeenten; de meeste hebben inmiddels een klimaatprogramma. Bij de uitvoering van hun beleid zijn gemeenten wel afhankelijk van de medewerking van bedrijven en burgers.

Wat klimaatengineeringstechnologieën betreft, zijn Oude Boerrigter en Barendrecht vooral geïnteresseerd in natuurlijke manieren om CO₂ vast te leggen. Dit zijn volgens hen belangrijke ecosysteemdiensten: diensten die door het ecosysteem aan mensen worden geleverd. Een voorbeeld hiervan is





beplanting, hoewel de schaal waarop dit kan worden ingezet vaak beperkt is. Van technologische oplossingen zijn ze minder gecharmeerd. Hoewel het tijdelijke overbruggingsmechanismen kunnen zijn, is een van de nadelen ervan dat ze veel energie kosten. Ze zien meer heil in mitigatie en adaptatie.

Vooralsnog leeft klimaatengineering niet onder commerciële adviesbureaus; er is nog geen markt voor. Het onderwerp is volgens Oude Boerrigter en Barendrecht meer iets voor onderzoeksinstituten als TNO.

Zo speelt een onderwerp als Solar Radiation Management is geen rol in de gebiedsontwikkelingsprojecten van nu, al noemen Oude Boerrigter en Barendrecht verschillende lokale koelingsprojecten om het *urban heat island effect* tegen te gaan. Zoals een project in Limburg, waarbij reflecterende materialen zijn gebruikt die direct een koelend effect hebben, waardoor hittestress afneemt. Ze vinden het jammer dat dit soort toepassingen nog nauwelijks van de grond komt in Nederland. Je zou hier veel meer mee kunnen doen, denk bijvoorbeeld aan het creëren van schaduwplekken bij het ontwerp van pleinen. Ook de juiste beplanting kan helpen bij het bevorderen van reflectie. Oude Boerrigter en Barendrecht zijn geïnteresseerd in verder onderzoek naar de effecten van inrichtingsmaatregelen, zeker wanneer dit onderzoek ook wordt vertaald naar de praktijk. Dat wil zeggen: het effect van een maatregel op de temperatuur moet kwantificeerbaar zijn, zodat een initiatiefnemer een goed onderbouwde investeringsbeslissing kan nemen. Vooralsnog speelt de overheid hierin eerder een belemmerende dan een stimulerende rol. Zo mag je je huis nog steeds niet zomaar wit schilderen.

Hoewel Oude Boerrigter en Barendrecht het met name over lokale maatregelen hebben, die dus niet onder klimaatengineering worden geschaard, zijn enkele lessen wel door te trekken naar klimaatengineering. Klimaatmaatregelen die meerdere doelen tegelijk dienen en waarvan de effecten goed kwantificeerbaar zijn, zijn populair. Kijk naar het Rotterdamse klimaatbeleid, daar zijn groene daken een onderdeel. Groene daken hebben niet alleen een isolerende werking, maar zien er ook mooi uit en vergroten de waterbergingscapaciteit van de stad.

De ontwikkeling van een technologie is volgens Oude Boerrigter en Barendrecht pas interessant als er een markt voor is. Als niemand vraagt om de toepassing van olivijn, zullen bureaus deze optie niet vanzelfsprekend aanbieden. Daarbij is de beste oplossing er dus één die meerdere doelen dient. Om bij het voorbeeld van olivijn te blijven: als het mineraal ook kan worden toegevoegd aan tuinaarde, is de drempel voor toepassing lager. Tot slot moet de rol van de overheid vooral faciliterend zijn. Regels staan toepassingen vaak eerder in de weg dan dat ze die bevorderen.

De term klimaatengineering is volgens Oude Boerrigter en Barenrecht heel technisch en kan daardoor acceptatie in de weg staan, net als bij CCS het geval was. Grootschalige toepassing van bijvoorbeeld olivijn kan een maatschappelijke reactie oproepen. Het werkt beter om maatregelen aan lokale doelen te koppelen.



Frans Rooijers en Mart Bles, CE Delft

"Klimaatengineering is geen science fiction"

CE Delft is een onafhankelijk onderzoeks- en adviesbureau, gespecialiseerd in het ontwikkelen van innovatieve oplossingen van milieuvraagstukken. (CE staat voor Committed to the Environment.) Frans Rooijers is directeur van CE Delft, Mart Bles is onderzoeker. In 2009 deed hij bij CE Delft onderzoek naar klimaatengineering voor zijn masterthese. Hij keek daarbij specifiek naar de kosten en baten van Ambient Air Capture (AAC) en Stratospheric Aerosol Injection (SAI).

Het scriptieonderzoek van Mart Bles diende voor CE Delft als een interne verkenning van het onderwerp klimaatengineering: waar hebben we het nu over, wat zijn de voor- en nadelen ervan? Sindsdien komt het onderwerp zo nu en dan ter sprake, onder andere in de Bezinningsgroep Energie waarvan CE Delft het secretariaat voert. In de Bezinningsgroep Energie worden gedachten uitgewisseld over het te voeren energiebeleid door mensen die werkzaam zijn in de politiek, bij de overheid, in het bedrijfsleven, in de milieubeweging en bij adviesorganen.

Klimaatverandering is volgens Rooijers en Bles een ernstig probleem, dat nog onvoldoende serieus wordt genomen. Vanuit technisch oogpunt zou het mogelijk moeten zijn om binnen de twee graden-grens te blijven, maar door de trage ontwikkelingen op sociaalmaatschappelijk gebied lijkt dit niet realiseerbaar. Binnen de politiek en de maatschappij wordt nog te weinig aan klimaatverandering gedaan, zo was klimaatverandering geen issue in de verkiezingsprogramma's van 2012. Ook in het bedrijfsleven gebeurt wat hen betreft te weinig. 'Er zijn goedkope oplossingen om klimaatverandering aan te pakken, maar de prikkels om daar wat mee te doen ontbreken. Het klimaatbeleid wordt niet serieus opgepakt.' De hoofdverantwoordelijkheid daarvoor ligt bij de politiek, die geen harde afspraken maakt over doelstellingen. 'Een strak klimaatbeleid is het belangrijkste middel om klimaatverandering tegen te gaan.'

Mitigatie moet hierbij voorop staan: adaptatie en klimaatengineering bestrijden slechts de symptomen van een opwarmend klimaat en doen niets aan de oorzaak van het probleem: 'Het zijn pleisters.' Dit betekent niet dat we het niet moeten doen. Adaptatie is onontkoombaar, dat moet nu eenmaal gebeuren om de negatieve effecten van klimaatverandering op te kunnen vangen. Klimaatengineering kan eventueel als plan B dienen, als er te weinig bereikt



wordt met mitigatie, en als de kosten en risico's van klimaatverandering hoger lijken dan die van klimaatengineering.

Rooijers en Bles denken dat het beter zou zijn om CDR en SRM niet langer onder één noemer te scharen. 'De technologieën zijn te verschillend van aard.' Een duidelijk verschil tussen de twee clusters aan technologieën is dat SRM lokaal ingezet kan worden, terwijl het tot globale effecten kan leiden. CDR daarentegen haalt weinig uit als het niet door meerdere landen wordt opgepakt, en vereist daarom een internationaal raamwerk. SRM is effectief maar vaak risicovol. CDR ligt dichtbij mitigatie. 'CCS en herbebossing zijn eigenlijk maatregelen die tussen klimaatengineering en mitigatie in liggen.'

Rooijers stelt daarom een andere indeling voor: 1) mitigatie, 2) CCS, gekoppeld aan kolen of biomassa (zoals bijvoorbeeld BECCS), 3) herbebossing en 4) CDR. Herbebossing wordt nu al op kleine schaal uitgevoerd, bijvoorbeeld onder initiatieven zoals het Clean Development Mechanism (CDM) uit het Kyoto-protocol en het VN-programma REDD (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries). Op grote schaal herbebossen is echter problematisch.

Wat Rooijers en Bles betreft moeten we meer onderzoek uitvoeren naar klimaatengineering. 'Door klimaatengineering serieus als oplossing te beschouwen en verder te onderzoeken, neem je ook het klimaatprobleem serieus.' We hoeven ons daarbij niet te richten op specifieke technologieën, daarvoor weten we nog te weinig. Over het moral-hazard-dilemma (de angst dat onderzoek naar klimaatengineering een negatief effect zou hebben op huidige mitigatie-inspanningen) hoeven we ons volgens Bles en Rooijers geen zorgen te maken. 'Dat kan net zo goed de andere kant op werken: door klimaatengineering als serieuze optie naar voren te schuiven, worden mensen juist bewust van de ernst van het klimaatprobleem. Het onderzoek naar klimaatengineering kan op die manier de discussie over klimaatverandering een nieuwe impuls geven.' Rooijers vergelijkt het met CCS: de technologie wordt weinig ingezet, maar heeft wel veel teweeggebracht. 'CCS heeft een grote rol gespeeld in de acceptatie van emissieplafonds en CO₂-doelen. Door CCS als technologie aan te bieden en daarbij ook de juiste financiële prikkels te geven, zijn bedrijven eerder geneigd zich aan klimaatafspraken te committeren. Op deze manier zou ook klimaatengineering bij kunnen dragen aan het stellen van bindende doelen.'

Toepassing is nog heel ver weg. 'We hebben het over ingrepen op een klimaatstelsel dat zeer complex is, we moeten eerst meer weten over de risico's en effecten.' Als het uiteindelijk wel tot toepassing komt, is regulering vereist. Net zoals onderzoek naar klimaatengineering gereguleerd moet worden, bijvoorbeeld door een raamwerk onder de VN. Rooijers denkt aan een toetsingscommissie die zou kunnen afwegen welke technologieën veilig en aanvaardbaar zouden zijn en welke niet, net zoals nu bij medicijnen gebeurt. Bles maakt



hierbij de kanttekening dat de risico's van SRM-technologieën nooit met volle zekerheid kunnen worden voorspeld en dat die risico's onomkeerbaar zouden kunnen zijn. Beslissingen kunnen daarom niet zonder meer teruggedraaid worden.

Hoewel ze zelf geen onderzoek naar klimaatengineering gepland hebben, moedigen Rooijers en Bles een discussie op maatschappelijk gebied aan. 'Er moet over klimaatengineering gesproken worden, zodat we het ook over de randvoorwaarden kunnen hebben.' Bovendien kan het onderzoek gepaard gaan met educatie: het publiek moet meer over klimaatengineering weten, met name dat het slechts een pleister is. 'De discussie over klimaatengineering moet niet op een conceptueel niveau blijven steken. Het moet tastbaar worden en dat kan door actief met klimaatengineering te experimenteren. Kijk maar naar CCS: wanneer er gesproken wordt over boringen in Barendrecht is het publiek actief betrokken. We moeten mensen laten schrikken.' Ook moet klimaatengineering van het 'scifi-gehalte' af: het is echt en we moeten het niet willen censureren. 'Het onderwerp leeft op internationaal niveau, we kunnen onze kop dus niet in het zand steken.' De Nederlandse overheid zou een actievere houding moeten innemen ten opzichte van klimaatengineering. 'Laten we maar op kleine schaal experimenteren, zodat de discussie over het onderwerp loskomt. Op die manier wordt ook het klimaatprobleem serieus genomen.'

Rolf Schipper, campagneleider Greenpeace

“Klimaatengineering is gevaarlijk”

Rolf Schipper is campagneleider klimaat en energie van Greenpeace Nederland. Met hem vond een e-mailwisseling plaats.

Greenpeace voert geen campagne en profileert zich niet op het thema geo-engineering. Wel heeft de milieuorganisatie hier een helder standpunt over. Volgens Rolf Schipper, campagneleider klimaat en energie, is geo-engineering een gevaarlijke manier om de ontwrichting van het klimaatsysteem te compenseren. De gevolgen van geo-engineering zijn onvolledig in kaart te brengen en kunnen een groot (onbedoeld) negatief effect hebben op het klimaatsysteem als natuur en milieu.

Daarnaast leveren deze technologieën geen daadwerkelijke oplossing op, nog steeds is mitigatie noodzakelijk. Klimaatverandering moet volgens Greenpeace zoveel mogelijk worden beperkt door de oorzaken aan te pakken. Het risico bestaat dat aandacht voor geo-engineering afleidt van aandacht voor mitigatie, als de hoogstnoodzakelijke energietransitie. Schipper is niet principieel tegen technologieën als het wit verven van verharde oppervlakten, maar gelooft niet dat hier veel van te verwachten valt.

De miljarden die de ontwikkeling van geo-engineering zou kosten, kunnen beter in een schone energievoorziening worden gestoken, het behoud van bossen en een duurzame landbouw. Daarbij is (her)bebossing volgens Schipper geen vorm van geo-engineering, maar herstel van al eerder gekapt bos.



Sible Schöne, Klimaatbureau HIER

“Praten over SRM kan werken als shocktherapie”

Sible Schöne is programmadirecteur van HIER Klimaatbureau, een initiatief van meer dan dertig maatschappelijke organisaties die heel Nederland willen betrekken bij de oplossing van het klimaatprobleem. Daarnaast is Schöne voorzitter van de Bezinningsgroep Energie en programma-directeur van de Stichting Klimaatvriendelijk Aanbesteden en Ondernemen (SKAO).

Volgens Schöne zijn er goede redenen om de opwarming van de aarde onder de twee of misschien zelfs onder de 1,5 graden te willen houden. ‘We weten niet precies wat de gevolgen van klimaatverandering zijn, dat is het onzekerste deel in het verhaal van het IPCC. Het belangrijkste kenmerk van klimaatverandering is de traagheid waarmee het systeem reageert. Wat we nu uitstoten, heeft pas over een jaar of veertig effect. Dit maakt een maatschappelijke discussie over het probleem erg lastig.’ Volgens Schöne ervaren we nu de eerste signalen van klimaatverandering. ‘De komende veertig jaar zal de temperatuurstijging volgens de meeste scenario’s nog beperkt zijn, maar daarna zal de temperatuur omhoog schieten. Om dat te voorkomen, moeten we de komende tien jaar aan de bak.’

In theorie is het volgens Schöne mogelijk om de temperatuurstijging onder de twee graden te houden, maar in praktijk is dit ‘heel optimistisch gedacht’. Door allerlei factoren wordt er weinig politieke actie ondernomen. Zo maakt scepsis over klimaatverandering de kans op een effectief klimaatverdrag klein, vooral in de VS. ‘Er bestaat daar weinig draagvlak voor klimaatbeleid. Al Gore heeft het bedrijfsleven ook niet meegekregen.’

De belangrijkste strategieën om klimaatverandering te voorkomen, zijn energiebesparing en de bescherming van bos. Energiebesparing is echter heel lastig: ‘Er is een rigide beleid voor nodig en daar is de politiek niet toe bereid. Er wordt vooral ingezet op duurzame energie.’

Schöne staat nuchter tegenover de inzet van technologie. ‘CDR kan een bijdrage leveren aan het beperken van klimaatverandering.’ Hij ziet CDR niet als iets fundamenteel anders dan mitigatie. ‘Olivijn bijvoorbeeld werkt waarschijnlijk traag, maar verschilt in ruimtegebruik niet fundamenteel van de inzet van biomassa.’ Ook technologieën als biochar en BECCS ziet Schöne als vormen van mitigatie. Om de mogelijkheden van CDR in kaart te brengen, is onder-



zoek nodig en zou een internationaal onderzoeksprogramma gefinancierd moeten worden.

Met SRM daarentegen ligt het veel ingewikkelder, al leent de discussie over de verschillende technologieën zich goed voor een shocktherapie: 'De discussie over SRM kan laten zien hoe urgent het onderwerp klimaatverandering is.' De bedoeling van SRM-technologieën is dat zonlicht weerkaatst wordt, ze grijpen dus in op het albedo (weerkaatsingsvermogen) van de aarde. We weten dat kleine veranderingen hierin al grote effecten hebben; een kleine albedoverandering kan de aarde doen opwarmen of juist doen afkoelen. 'Inzicht in het effect van deze albedoverandering is belangrijk om te weten wat het effect van SRM kan zijn. We willen ook geen nieuwe ijstijd creëren.'

Volgens Schöne kunnen we het effect van deze albedoverandering al *in real time* onderzoeken. We zijn namelijk al bezig het albedo van de aarde te veranderen doordat de Noordpool afsmelt. Deze ijsmassa reflecteert zonlicht, dus als het ijs gesmolten is, zal dat een opwarmend effect hebben. 'In die zin verschilt toepassing van SRM niet fundamenteel van wat we nu al doen: het grootschalig ingrijpen in de stralingsbalans van de aarde. Daarom is het smelten van de Noordpool een goede onderzoekscase.' Het inzetten van SRM om dit afsmelten te voorkomen is volgens Schöne niet aan de orde.

De vraag wanneer klimaatverandering dan wel zo erg zou kunnen worden dat je SRM zou willen toepassen, is volgens Schöne nu niet beantwoorden. 'Want wát wordt "zo erg"? De zeespiegelstijging is een traag proces. Enorme bosbranden als gevolg van een structurele droogte in de Amazone? Mislukte oogstendoor het stilvallen van de moesson of door extreme droogte?'

De meeste van dit soort effecten treden regionaal op. Een land zou zelfstandig kunnen besluiten om klimaatengineering toe te passen. De VS bijvoorbeeld, of China. China heeft ervaring met weermodificatie. Schöne vraagt zich hierbij af of het onderzoek naar ethische of juridische aspecten prioriteit heeft. 'Mag één land het klimaat beïnvloeden, mag je SRM toepassen als je niet weet wat de gevolgen daarvan zijn? Deze vragen spelen en ze zijn belangrijk, maar je moet ze uit de abstracte sfeer halen. We doen het namelijk al.'

Op dit moment leeft het onderwerp klimaatengineering niet in Nederland, constateert Schöne. 'Je kunt pas een serieuze discussie voeren over klimaatengineering in relatie tot klimaatverandering als mensen het klimaatprobleem serieus nemen. Men houdt zich vooral bezig met de algemene duurzaamheidsdiscussie. Daarbinnen is het is maar een heel klein clubje dat zich bezighoudt met het oplossen van het klimaatprobleem, in plaats van te pleiten voor hun eigen duurzame energieoplossing.'



De discussie over klimaatengineering kan als gezegd werken als shocktherapie: het schudt mensen wakker. De vraag is of de acute bedreigingen van het klimaatsysteem zo groot zijn dat ze de inzet van klimaatengineering rechtvaardigen. Schöne denkt van niet: 'Het enige echt mondiale kantelpunt is het afsmelten van de ijskap van West-Antarctica, en wetenschappers zeggen dat het nog lang zal duren voordat dat zijn beslag krijgt. Maar wie weet ontstaat er een regionale vorm van bottom-up klimaatengineering. Bijvoorbeeld bij vijf jaar aanhoudende droogte in Texas.'

Sible Schöne is kortom pragmatisch over CDR: 'Vooral toepassen als het iets kan bijdragen.' Maar er moet meer onderzoek plaatsvinden voordat je iets zinnigs kunt zeggen over de toepassing van SRM. Hij is er in ieder geval niet principieel op tegen. 'Het is al winst als een rapport over klimaatengineering kan bijdragen aan een discussie over klimaatverandering.'

Olaf Schuiling, geochemicus

Pionier op gebied van olivijn

Prof. dr. R.D. (Olaf) Schuiling is geoloog en petroloog. Van 1972 tot 1997 was hij hoogleraar geochemie aan de Universiteit Utrecht, daarnaast bekleedde hij tal van nevenfuncties. Schuiling is een pionier op het gebied van versnelde verwering van het mineraal olivijn. In 2009 richtte hij de Stichting Olivijn op.

In 2007 lanceerde Sir Richard Branson de Virgin Earth Challenge, een prijs van 25 miljoen dollar voor de beste technologie om CO₂ uit de lucht te halen. Zes jaar later is er nog steeds geen winnaar bekend gemaakt. Wel is er uit meer dan 2600 voorstellen een shortlist opgesteld van elf finalisten. Een van die finalisten is Olaf Schuiling met zijn concept Smart Stones.

Olaf Schuiling neemt de klimaatverandering zeer ernstig op. 'Vóór onze tijd zijn er ook grote klimaatschommelingen opgetreden, maar toen waren we nog niet met zeven miljard mensen op aarde. Volgens klimaatwetenschappers zijn sommige tipping points al in gang gezet. Het voortbestaan van de mensheid zal niet op het spel komen te staan, maar het is de vraag of een land als Bangladesh zal overleven. Nederland zal het daarentegen wel redden, wij hebben de nodige technische middelen om aanpassingen te kunnen doen.'

Schuiling heeft 'nul vertrouwen' in de gangbare oplossingsstrategieën. 'Mitigatie is noodzakelijk, maar gaat veel te langzaam. Misschien zou dat anders zijn als men zou ophouden met praten en daadwerkelijk iets zou gaan doen. Het is veel sneller, goedkoper en beter voor de werkgelegenheid om andere wegen te bewandelen.'

Die andere weg is klimaatengineering. Onder dit begrip wordt nu wat Schuiling betreft echter ook 'allerlei flauwekul' geschaard: 'Solar Radiation Management is science fiction, Paul Crutzen is zelf ook al teruggekomen van het idee om sulfaat in de lucht te brengen om zonlicht te weerkaatsen.' Carbon Dioxide Removal heeft wél potentieel: 'De prijsvraag van Branson heeft zinnige voorstellen opgeleverd. De productie van biochar is bijvoorbeeld ook heel interessant. Misschien is een combinatie met de toepassing met olivijn mogelijk.'

Olivijn is een mineraal dat in grote hoeveelheden in de bodem voorkomt, het is een van de hoofdmineralen van de aarde. Het komt op alle continenten voor, meestal dicht aan de oppervlakte. Bij natuurlijke verwering neemt olivijn CO₂ op uit de atmosfeer. Hiermee is het een natuurlijke buffer, een ingebouwd



feedbackmechanisme om de CO₂-concentratie in de atmosfeer te stabiliseren. Hoe hoger de CO₂-concentratie namelijk is, hoe sneller de verwerking verloopt. Waarschijnlijk verweert olivijn nu al sneller dan honderd jaar geleden, maar door de hoge CO₂-uitstoot desalniettemin te langzaam om klimaatverandering te voorkomen.

Schuilings idee is om het natuurlijke verweringsproces te versnellen. 'Door olivijn enigszins te vermalen, kunnen deeltjes van circa honderd micron binnen vijf jaar verwerken. In principe zou de CO₂-concentratie in de atmosfeer met de toepassing van olivijn kunnen worden teruggebracht van 400 ppm, waar we nu bijna aan zitten, naar een lagere concentratie. Echter niet noodzakelijk naar 280 ppm, zoals voor de industriële revolutie.'

Critici wijzen op de nadelige kanten van het verhaal. Zo zou toepassing van olivijn bijvoorbeeld veel landoppervlak vergen, land dat ook voor andere doeleinden gebruikt kan worden.

'Je zou per jaar zeven kubieke kilometer aan olivijn nodig hebben om het klimaatprobleem op te lossen. Na het mijnen en malen moet je het olivijn uitstrooien over land, stranden of ondiepe zeeën. Hiervoor is twee miljoen vierkante kilometer land nodig. Dit olivijn moet één keer in de vijf jaar vernieuwd worden.'

Het zou noodzakelijk zijn om olivijn heel fijn te vermalen en te verhitten, waardoor het proces erg duur en energie-intensief zou zijn.

'Dat is niet nodig, een redelijk grove vermaling volstaat. Voldoende vermalen en uitstrooien kost tien tot vijftien euro per ton olivijn.'

De verwerking van olivijn zou erg lang duren.

'Die resultaten komen uit labexperimenten. Uit praktijkproeven blijkt dat de verwerking onder invloed van natuurlijke processen veel sneller gaat.'

Zoals gezegd vergt de delving van olivijn mijnbouw. Hiertoe zou een aantal mijnen geopend moeten worden, waarbij het olivijn vlakbij de mijn moet worden uitgestrooid om transport te beperken. Ingrepen in het landschap zijn hierbij onvermijdelijk, maar ook hier heeft Schuiling een oplossing voor bedacht. 'Olivijn bevat nikkel. We kunnen daarom oude nikkelmijnen gebruiken, wat ook weer banen oplevert voor de lokale bevolking. Hierdoor is de mijnbouw van olivijn commercieel interessant. De mijnbouwindustrie heeft al interesse getoond.' De totale kosten zouden uitkomen op tweehonderd miljard euro per jaar, een bedrag dat bij elkaar kan worden gebracht door één cent carbontaks per liter brandstof op alle brandstoffen wereldwijd.

Olivijn kan niet alleen worden toegepast op land, maar ook in oceanen. 'Olivijn heeft geen effect op het ecosysteem. Het zorgt ervoor dat de pH-waarde iets



stijgt en er zit ook een beetje ijzer in, wat voor extra planktongroei kan zorgen. Ook op land kan olivijn een bemestende werking hebben. Op arme tropische gronden kan het extra magnesium in de bodem brengen en voor gratis bekal-king zorgen.'

Alle voordelen ten spijt: olivijn biedt geen oplossing voor de oorzaken van klimaatverandering.

'Dat klopt, maar het klimaatprobleem is te urgent om dat eerst op orde te krijgen. We moeten op korte termijn CO₂ uit de lucht halen en daarnaast mitigatie opstarten. Een energietransitie is sowieso noodzakelijk, omdat de fossiele brandstoffen opraken. In opkomende economieën zullen de kolen-voorraden eerst verstookt worden. Logisch, gezien hun recht op ontwikkeling. We kunnen ons gedrag langzaam aanpassen, in tussentijd is er olivijn. De toepassing kan op korte termijn plaatsvinden.'

Schuiling geeft aan niet zo geïnteresseerd te zijn in de kritische discussie rondom het gebruik van olivijn. Hij heeft geen contact met maatschappelijke groeperingen als ngo's over de toepassing van olivijn (als vorm van klimaat-engineering), en zal zich ook niet door deze discussie laten leiden.

Hoe komt het nu dat er, gezien de ernst van het klimaatprobleem en alle voor-delen van olivijn, niet overal ter wereld olivijn wordt gewonnen en uitgespreid over land?

'Leken zijn enthousiast over het verhaal, maar de politiek neemt het niet erg serieus. We hebben in Nederland ingezet op CCS, en daar zitten we nu van-wege alle commerciële belangen aan vast. De CCS-wereld is tegen andere methoden om CO₂ vast te leggen. Maar er begint wel respons te komen vanuit de hoek van bijvoorbeeld dakdekkers en woningbouwcorporaties, die olivijn willen gebruiken op daken van woningen. De gemeente Rotterdam denkt aan olivijn in bestratingen, en ook de Zwolse golfbaan heeft interesse getoond. Het zet allemaal nog niet echt zoden aan de dijk, maar alle initiatieven samen zorgen ervoor dat veel mensen betrokken zijn. We zouden 's winters bijvoor-beeld ook met olivijn in plaats van zout kunnen strooien.'

Ook internationaal is er interesse. Schuiling is op uitnodiging in Qatar geweest om lezingen te geven. Uit de wetenschappelijke geochemische wereld komen steeds meer enthousiaste reacties. Was Schuiling eerder de enige weten-schapper met interesse voor olivijn, inmiddels doen steeds meer collega's onderzoek naar het vermogen van dit mineraal om CO₂ op te nemen.



Henk Simons, adviseur biodiversiteit IUCN

“Richt je op de oorzaak van het probleem”

Henk Simons is als senior adviseur biodiversiteit werkzaam bij de International Union for the Conservation of Nature (IUCN). De IUCN is de grootste wereldwijde organisatie op het gebied van natuurbescherming en zet zich in om het behoud en duurzaam gebruik van natuurlijke hulpbronnen te bevorderen. Hierbij vormt het een platform voor Nederlandse ngo's en ondersteunt het ngo's in ontwikkelingslanden.

Simons vindt het klimaatprobleem een belangrijk vraagstuk dat het beste aan andere vraagstukken gekoppeld kan worden, zoals waterschaarste, voedselzekerheid en de degradatie van ecosystemen. We moeten ernaar streven om binnen een opwarming van twee graden te blijven en kunnen dit het beste doen door tegelijkertijd op andere milieuvraagstukken te focussen: 'Als we maatregelen nemen die ook een oplossing bieden voor andere milieuproblemen, kunnen we synergie creëren. Vermindering van consumptie is niet alleen goed vanwege het klimaatprobleem, maar vermindert ook de uitputting van natuurlijke hulpbronnen.'

Hierop aanhakend, zegt Simons dat we er wel voor moeten waken dat we niet alle milieuproblemen aan klimaatverandering toeschrijven. 'Het moet in de goede context geplaatst worden. Zo moet je het verlies van biodiversiteit niet alleen te zien als een negatief effect van klimaatverandering, maar ook als een op zichzelf staand probleem dat gerelateerd kan worden aan de groeiende wereldbevolking en aan toenemende urbanisatie.' Bovendien vindt hij dat de toonzetting met betrekking tot klimaatverandering 'niet te alarmistisch' moet zijn. Dit zou kunnen leiden tot ingrepen die de plank volledig mis slaan: 'We moeten opletten wat er feitelijk aan de hand is en aan de hand van die kennis keuzes maken. Dit is een belangrijke uitdaging.'

De oorzaak van het klimaatprobleem ligt in het huidige consumptiepatroon en energieverbruik, daar moeten en kunnen we dan ook iets aan doen: 'We moeten die transitie maken naar een groene en duurzame economie.' Simons merkt positieve signalen op die zo'n transitie kunnen bevorderen, ook al is er in de (internationale) politiek nog niet veel gebeurd. In Nederland ziet Simons binnen het bedrijfsleven goede initiatieven tot stand komen, de Nederlandse overheid moet daarentegen harder aan de slag omdat zij op dit vlak nog te weinig doet.



Over oplossingen is Simons duidelijk: 'Terug naar de kern van het probleem. Mitigatie is nog steeds het belangrijkste, we moeten de CO₂-uitstoot reduceren door te letten op onze consumptie, met name op voeding en energiegebruik.' Daarnaast is adaptatie 'altijd noodzakelijk', omdat de opwarming nog door zal zetten, ook als er mitigatie plaatsvindt. Simons ziet het liefst oplossingen die gebruik maken van de natuur: zo kan bijvoorbeeld het natuurlijk behoud van mangroven het gevaar op overstromingen verminderen.

In brede zin is Simons bekend met het onderwerp klimaatengineering, hoewel hem niet helemaal duidelijk is wat er precies onder valt. Het is volgens hem belangrijk dit helder te krijgen voordat we hierover in debat treden. 'Waar hebben we het nu eigenlijk over? Wat wordt er met klimaatengineering bedoeld? Zijn vormen van mitigatie zoals CCS of grootschalige bebossing ook klimaatengineeringstechnologieën? Als we serieus over dit onderwerp willen praten en er onderzoek naar willen doen, moeten dit soort dingen duidelijk zijn.'

Hoewel technologische oplossingen de natuur een handje kunnen helpen, zegt Simons dat we niet alleen naar end-of-pipe-oplossingen, zoals klimaatengineering, moeten kijken. 'We moeten oppassen dat we geen verkeerde signalen afgeven. Als we klimaatengineering sterk propageren, zou het gevoel dat mitigatie noodzakelijk is misschien wel afnemen.' (Dit staat ook wel bekend als het moral hazard-dilemma.) 'We moeten dus goed nadenken over investeringen die we in klimaatengineering zouden stoppen.' Wat onderzoek betreft geeft Simons geen prioriteit aan klimaatengineering. 'We kunnen beter kijken naar de oorzaken van het klimaatprobleem en daar maatregelen tegen nemen.' Anderzijds wil Simons klimaatengineering ook niet meteen van tafel schuiven. 'Soms bieden op de natuur gebaseerde oplossingen geen uitweg, en in dat geval kan technologie een belangrijke rol spelen. Daar moet je ook voor durven kiezen, maar we moeten wel beter inzicht krijgen in langetermijneffecten, risico's, kosten en baten. Wat zijn de effecten van klimaatengineering op andere terreinen? Klimaatengineering kan ook risico's met zich meebrengen, dus dan zouden we een afweging moeten maken tussen de effecten van het probleem en de effecten van de oplossing. 'Het zou het beste zijn om maatregelen te combineren en zo een win-winsituatie te creëren, waarbij negatieve effecten minimaal zijn en positieve effecten optimaal.'

Tot slot zegt Simons dat klimaatengineering binnen Nederlandse ngo's nog geen groot gespreksonderwerp is. Ook de IUCN heeft er geen uitgesproken mening over. 'Ons voornaamste punt is dat we voorzichtig moeten zijn met de aanname dat de techniek altijd wel een oplossing biedt. Belangrijker is dat we ons bezighouden met de oorzaak van het probleem, en dat we ons richten op de vraag hoe we gebruik kunnen maken van natuurlijke systemen om die problemen aan te pakken. We moeten bovendien inzetten op een transitie naar een groene economie.' Voor de Nederlandse overheid is het belangrijk



niet alles door de klimaatbril te bekijken. 'Onderwerpen zoals voedselzekerheid en waterschaarste zijn ook los van het klimaatdebat belangrijke zaken waar iets aan gedaan moet worden.'

Appy Sluijs, paleoceanograaf

“Energiebesparing voorlopig beter dan klimaatengineering”

Appy Sluijs is universitair docent paleoceanografie aan de Universiteit Utrecht. Hij doet onderzoek naar klimaatveranderingen in het geologisch verleden en naar de relatie tussen CO₂ en het klimaat op aarde.

Appy Sluijs onderzoekt hoe het klimaat er in het verleden uitzag (en onder welke omstandigheden) en kan hierdoor vergelijkingen maken met het heden. Het klimaat is namelijk geen statisch gegeven; het is voortdurend in verandering, en die verandering is doorgaans afhankelijk van de concentratie aan CO₂ in de atmosfeer. ‘Als je aan deze CO₂-knop gaat draaien, verandert het klimaat.’ Studie van CO₂-concentraties die in het verre verleden gepaard gingen met klimaatveranderingen, maakt een vergelijking met huidige modellen mogelijk.

De onzekerheid voor de toekomst bestaat uit twee dingen: 1) emissiescenario's, en 2) de gevoeligheid van het klimaat voor veranderingen in de concentratie aan broeikasgassen. ‘Het is belangrijk die onzekerheid te blijven communiceren.’ Het vijfde rapport van het IPCC, waarvan het eerste deel in september 2013 is uitgekomen, zegt dan ook weinig anders dan het vierde rapport wat betreft de klimaatgevoeligheid: bij een verdubbeling van de CO₂-concentratie in de atmosfeer (tot 560 ppm) zal de temperatuurstijging tussen de 1,5 en de 4,5 graden bedragen. Dit zal, afhankelijk van de emissiescenario's, ergens in de tweede helft van deze eeuw een feit zijn. Belangrijk is dat de opwarming achter de CO₂-stijging aanhobbelt: na tien jaar is pas zo'n vijftig procent van de opwarming bewerkstelligd. ‘De meeste klimaatwetenschappers gaan uit van een gevoeligheid van drie graden, maar we kunnen 1,5 en 4,5 graden niet uitsluiten. Het zou niet zo verstandig zijn om op drie graden te gokken en geen rekening te houden met een sterkere stijging. Voorlopig zal deze onzekerheidsmarge ook niet veel kleiner worden.’

In het extreemste scenario van het IPCC wat betreft emissiescenario's en klimaatgevoeligheid is de temperatuurstijging bijna zes graden aan het eind van deze eeuw. Deze hoge stijgingen zijn volgens veel klimaatengineers reden om onderzoek naar dit soort technologieën te doen. Zijn zij nu overdreven alarmistisch? Volgens Sluijs kan de temperatuur sterker stijgen dan 4,5 graden als de emissies door de verbranding van fossiele brandstof (olie, gas, kolen, maar ook olie uit teerzanden bijvoorbeeld) volgens dat scenario zullen plaatsvinden. In dat geval zal de CO₂-concentratie in de atmosfeer hoger oplopen dan 560 ppm. Bij het verbranden van alle fossiele brandstoffen de komende



eeuwen kan de CO₂-concentratie stijgen tot 1800 ppm (daarbij wordt extra CO₂ en CH₄ uit permafrost of methaanhidraten niet meegerekend).

Sluijs benadrukt dat hij niet alarmistisch wil overkomen: 'We kunnen geen beleid voeren op alarmisme.' Hij corrigeert dan ook ngo's die zich te alarmistisch over het klimaatvraagstuk uitlaten. Dit is geen basis voor een effectieve discussie en dit kan averechts werken in de actiebereidheid van burgers. Maar vanuit geologisch perspectief gaat de opwarming nu erg snel; extreem snel in de geschiedenis van de aarde. 'Voor zover we nu kunnen zien, is er nog nooit zo'n snelle toename in de CO₂-concentraties voorgekomen als op dit moment. Wat deze relatief snelle opwarming extra problematisch maakt, is dat we ons in onze huidige maatschappij veel minder goed kunnen aanpassen aan een snelle dan aan een langzame klimaatverandering.'

Hoe zit het nu met de zogenoemde kantelpunten of tipping points? Vonden deze nu ook al plaats in het verleden en is de kans reëel dat ze nu ook kunnen optreden, zoals sommige klimaatengineers zeggen?

Sluijs legt uit dat tipping points plotselinge veranderingen in het klimaatstelsel zijn, waardoor het systematisch naar een nieuwe staat gaat. Een voorbeeld hiervan is het zeeijs op de Noordpool. Als dit zeeijs afsmelt is het weg, en komt het de komende millennia ook niet meer terug; het systeem is in een andere staat terechtgekomen (water in plaats van ijs). Het optreden van een tipping point kan weer verdere klimaatverandering veroorzaken. In het voorbeeld van het afsmelten van zeeijs wordt het zonlicht niet meer door het ijs gereflecteerd en zal de aarde verder opwarmen.

Hoe weet je nu of er een tipping point aan komt? Als je naar de lange termijn kijkt – naar de geologische schaal – zie je dat er eerst wat variatie komt in een tot dan toe stabiel systeem. Daarna treedt er een grote verandering op, en keert het systeem niet meer terug naar de oude staat. Wanneer de grote verandering plaatsvindt, is echter vooraf niet zo gemakkelijk te voorspellen. Volgens het IPCC zal het zeeijs van de Noordpool in de eerste helft van deze eeuw verdwijnen; dit tipping point is misschien niet meer te voorkomen. Veel andere tipping points zijn waarschijnlijk nog te voorkomen, maar volgens Sluijs bestaat er hierover nog veel wetenschappelijke onzekerheid.

'In het verre verleden vonden aan de lopende band tipping points plaats door natuurlijke oorzaken. Sommige kennen we hierdoor en kunnen we voorspellen. Een voorbeeld hiervan is het smelten van de permafrost in onder andere Siberië. We weten dat dit gebeurt en dat het zal toenemen. We weten echter nog niet hoe snel en hoe veel hierdoor het vrijkomen van methaan, ook een broeikasgas, en CO₂ uit die gebieden toe zal nemen. In de toekomst zal dit zeker effect hebben, maar in de komende twintig jaar zal dat effect nog heel beperkt zijn ten opzichte van de uitstoot van CO₂ door de verbranding van fossiele brandstoffen.'



De meeste grotere *feedbacks* vinden plaats op langere tijdschalen, een aantal kleinere kunnen aan het eind van deze eeuw al wel belangrijk worden. Voorbeelden hiervan zijn het smelten van de ijskappen, vegetatieveranderingen als de uitbreiding van de woestijn, en biologische veranderingen in de oceanen. De opwarming die deze *feedbacks* veroorzaken komt bovenop de klimaatgevoeligheid van 1,5 tot 4,5 graden van het IPCC.

Vooralsnog zijn deze *feedbacks* op lange termijn ondergeschikt aan die op kortere termijn. 'De invloed van deze *feedbacks* is nog te beperken. Als we nu stoppen met de uitstoot van CO₂, wordt het merendeel van de uitgestoten CO₂ op termijn door de oceanen opgenomen.' Of dit gaat gebeuren, hangt volgens Sluijs van de politiek en van innovatie af. Wetenschappers moeten alternatieven ontwikkelen – en hier wordt volgens Sluijs grote vooruitgang geboekt. Echter, de politiek moet besluiten tot een snelle transitie en dit ziet hij niet gebeuren. De grootste kansen liggen volgens hem in het bedrijfsleven. Hij is hoopvol dat er iets gaat gebeuren, maar hij weet niet of de inspanningen voldoende zullen zijn om sterk merkbare klimaatverandering te voorkomen.

Over klimaatengineering is Sluijs niet per definitie negatief, maar hij is wel kritisch. Volgens hem kunnen we klimaatengineering nooit risicoloos toepassen. 'In voorspellingen over het klimaatsysteem zitten grote onzekerheden, waardoor we niet precies zullen weten wat het effect zal zijn van met name Solar Radiation Management.' Sluijs vindt desondanks dat er in ieder geval onderzoek moet worden uitgevoerd naar SRM. Hieruit moet duidelijk worden of ingrijpen in het klimaatsysteem verstandig is of niet. Ook noemt hij het probleem van de verzuring van de oceanen dat niet getackeld wordt met SRM. Desalniettemin vindt hij het 'geen complete nonsens'. Sluijs benadrukt dat hij Ken Caldeira persoonlijk kent en dat hij een van de slimste mensen is die hij ooit heeft ontmoet. Caldeira is een belangrijke wetenschapper op het gebied van SRM.

Wat betreft Carbon Dioxide Removal is Sluijs wat sceptisch. Hoewel CDR minder risicovol is dan SRM, is onze CO₂-uitstoot nu zo groot dat het de vraag is of CDR een rol van betekenis kan spelen in het beperken van klimaatverandering. 'CDR gaat over het vastleggen van megatonnen CO₂, terwijl we gigatonnen uitstoten. Op korte termijn is veel meer winst te behalen uit energiebesparing.'

Jan-Berend Stuit, marien geoloog

“Onderzoek naar ijzerbemesting is urgent”

Jan-Berend Stuit doet onderzoek naar woestijnstof in oceanen. Stuit staat bekend als dé Nederlandse stofonderzoeker. Hij is als senior onderzoeker verbonden aan de afdeling mariene geologie van het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ) op Texel. In juli 2012 honoreerde NWO zijn onderzoeksvoorstel TRAFFIC: Transatlantic fluxes of Saharan dust and ocean-climate impacts.

Natuurlijk stof, zoals woestijnstof uit de Sahara, draagt nutriënten met zich mee, bijvoorbeeld ijzer en koper. Jan-Berend Stuit onderzoekt ‘hoeveel van welk woestijnstof precies waar in zee terecht komt, welke nutriënten het levert, hoe woestijnstof onderweg verandert van bron naar afzettingsgebied, en wat de gevolgen zijn voor de oceaan’.⁷ Zijn TRAFFIC-onderzoek kan meer inzicht geven in de gevolgen van nutriëntentekorten en in de mogelijkheden die ijzerbemesting biedt om klimaatverandering te beperken of tegen te gaan.

Stuit bekijkt hoe nutriënten als ijzer en koper de algengroei in oceanen stimuleren. Algen nemen CO₂ op in hun kalkskeletjes en zinken bij sterfte af naar de bodem. ‘Theoretisch biedt dit een mogelijkheid om de CO₂-concentratie substantieel te laten dalen. Uit geologische data blijkt dat de natuurlijke schommeling van CO₂ in de atmosfeer 100 ppm is. Dat zou betekenen dat de concentratie aan CO₂ via natuurlijke processen kan worden teruggebracht van 400 tot 300 ppm.’

Wereldwijd zijn er inmiddels vijftien kleinschalige experimenten uitgevoerd met ijzerbemesting van oceanen. ‘Nuttige experimenten, omdat ze informatie geven over de werkingsmechanismen. De algemene conclusie is dat de toevoeging van ijzer tot algengroei leidt. Met een paar kanttekeningen: het moet opgelost ijzer zijn, anders is het biologisch niet beschikbaar. Ook is er alleen een effect te bespeuren in water met een relatief hoog gehalte aan nutriënten en een relatief laag gehalte aan fytoplankton; *high nutrient low chlorofyll*-water.’

In hoeverre de algenskeletjes daadwerkelijk naar de oceaanbodem afzinken, is afhankelijk van de mate waarin transport plaatsvindt van de bovenste naar de onderste regionen van de oceanen. Stof kan hier een belangrijke rol in spelen, omdat stof de algen kan verzwaren.

7 <http://www.nwo.nl/actueel/nieuws/2012/Negen+voorstellen+in+Open+Programma+gehonoreerd.html>



De risico's die verbonden zijn aan de experimenten met ijzerbemesting zijn volgens Stuut verwaarloosbaar ten opzichte van de risico's die verbonden zijn aan de vervuiling van de oceanen. 'Wel bestaat er een reëel gevaar op het stimuleren van de verkeerde alg, wat in het LOHAFEX-experiment gebeurde. Er bestaan algen die CO₂ niet opnemen, maar juist uitstoten. Als deze alg gestimuleerd wordt, ben je uiteraard verder van huis.' (Zie voor uitleg over het LOHAFEX-experiment het interview met Hein de Baar.)

In het verleden was de ijzerconcentratie in de oceanen hoger, waren er meer algen en was de CO₂-concentratie in de atmosfeer lager. De vraag is echter wat er gebeurt bij grootschalige toepassing van ijzerbemesting. Beschikbare data over grootschalige toepassing komen volgens Stuut voort uit reconstructies van geologische tijdsschalen. Zijn kleinschalige experimenten simpelweg op te schalen?

'Ik doe experimenten met behulp van woestijnstof die modelmatig opgeschaald kunnen worden. Door de Sahara-stofpluim te volgen kan onderzocht worden welke nutriënten hiervan terug te vinden zijn in het sediment van oceanen, waardoor de hoeveelheid plankton gekwantificeerd kan worden. Hierdoor kunnen schattingen worden gemaakt van de totale hoeveelheid CO₂ die door algen vastgelegd zou kunnen worden. Er zijn echter nog te weinig data om deze schattingen hard te maken.'

Opschaling van de experimenten en grootschalige toepassing heeft in ieder geval ecologische gevolgen. Bij een verschuiving van nutriënten in de oceanen, zullen visgronden ook verschuiven, wat consequenties kan hebben voor de visvangst en bijvoorbeeld de walvisstand.

Een afweging over de toepassing van ijzerbemesting acht Stuut op dit moment momenteel niet mogelijk; eerst is meer inzicht vereist in de consequenties ervan, en dat inzicht moet voortkomen uit onderzoek. Voortzetten van onderzoek naar ijzerbemesting is volgens Stuut zelfs urgent, omdat het zeeijs op de Noordpool binnen vijftig jaar zou kunnen afsmelten. Dit zou een kantelpunt zijn in de opwarming van de aarde. Als het zeeijs smelt, daalt de zoutconcentratie van het zeewater, wat weer invloed heeft op de pompfunctie van de Atlantische Oceaan. Zonder pompfunctie geen warme Golfstroom, en zonder warme Golfstroom geen mild zeeklimaat meer in West-Europa.

Verschillende bedrijven zijn opgericht om ijzerfertilisatie op termijn te commercialiseren door het verkopen van koolstofkredieten. Rusland en China hebben al een deel van de Atlantische Oceaan geclaimd uit commerciële interesse naar delfstoffen. In de regulering van commerciële toepassing ligt volgens Stuut een taak voor de VN.



Pier Vellinga, klimaatwetenschapper

“Volop inzetten op transitie naar duurzame energie”

Pier Vellinga is hoogleraar klimaatverandering aan de Vrije Universiteit en aan Wageningen Universiteit & Research centrum (onderzoeksinstituut Alterra). Daarnaast bekleedt hij functies in de raden van bestuur van onder andere Kennis voor Klimaat, Klimaat voor Ruimte en het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ). Ook heeft hij een belangrijke rol gespeeld in het opzetten en begeleiden van het IPCC. In 2011 verscheen zijn populairwetenschappelijke boek *Hoezo klimaatverandering. Feiten, fabels en open vragen*, waarin hij inzicht geeft in het broeikaseffect.

Een globale opwarming van drie graden is volgens Pier Vellinga zeer waarschijnlijk. De stijging van atmosferische concentratie aan CO₂, veroorzaakt door de mens, ligt hieraan ten grondslag. Daarom blijft wat Vellinga betreft het reduceren van CO₂-emissies de betere oplossing om klimaatverandering tegen gaan en moeten we een transitie naar een duurzame samenleving doorzetten. Dit is mogelijk, ook op de korte termijn, omdat er al zoveel initiatieven lopen. Zo acht Vellinga het waarschijnlijk dat we rond het jaar 2050 nog maar twintig procent van onze huidige CO₂-emissies uitstoten ('het kan iets meer of minder zijn'). Hij ziet een tendens naar duurzame energie: er wordt bijvoorbeeld meer geïnvesteerd in zonnepanelen en bovendien zal het gebruik van fossiele brandstoffen afnemen vanwege geopolitieke spanningen. 'Duurzame energie is minder risicovol en dus aantrekkelijk. Hoewel de politiek nog op de rem staat, zie ik vanuit de samenleving veel initiatieven ontstaan waardoor ik vertrouwen heb in de opkomst van duurzame energietechnologieën.'

Adaptatie kan ons volgens Vellinga alleen hulp bieden bij een temperatuurstijging van één à twee graden. Aangezien hij eerder heeft gezegd dat we rekening moeten houden met een stijging van minimaal drie graden, is adaptatie alleen niet voldoende. De eerste paar graden van de temperatuurstijging zouden we met behulp van adaptatie nog kunnen overzien, maar het is geen oplossing voor de lange termijn.

Volgens Vellinga is het concept klimaatengineering ontstaan vanuit twee bewegingen: één vanuit de wetenschap en één vanuit de maatschappij. 'Enerzijds zijn er de traditionele weerbeïnvloeders, zoals de ruimtevaart en defensie, die het weer vaak vanuit strategisch oogpunt proberen te manipuleren. Dit idee is opgepakt door de klimaatwetenschap en vanuit wetenschappelijke interesse omarmt. Anderzijds is klimaatengineering maatschappelijk interessant, omdat



het ogenschijnlijk makkelijk en goedkoop zou zijn: is dit dan eindelijk onze *silver bullet* voor het klimaatprobleem?’

Vellinga betwijfelt of klimaatengineering daadwerkelijk zo goedkoop is. ‘Maar ook al zou dat zo zijn: de technologieën kunnen leiden tot grootschalige ecologische gevolgen, dus zouden we dit als maatschappij wel moeten willen?’ Hierbij doelt hij vooral op de SRM-technologieën, omdat die het klimaat ook negatief zouden kunnen beïnvloeden. ‘Het klimaatsysteem is zo complex, we kunnen daar niet zonder gevolgen mee experimenteren.’ Alleen op zeer lokaal niveau zou Vellinga SRM-technologieën eventueel willen overwegen, zoals bijvoorbeeld het spannen van een wit laken over de poolkappen. Ook dit lijkt hem echter niet realistisch, omdat lokale veranderingen invloed kunnen hebben op regionale en uiteindelijk globale weerpatronen.

Daarnaast heeft Vellinga het over de geopolitieke dimensie van SRM-methoden. ‘Lokale inspanningen hebben globale gevolgen, hoe moeten we hiermee omgaan?’ De effecten van SRM zijn niet gelijkmatig verdeeld, waardoor sommige mensen er baat bij hebben en anderen er juist nadeel van ondervinden. Het is volgens Vellinga zeer onwaarschijnlijk dat landen wereldwijd tot een overeenkomst over klimaatengineering kunnen komen, juist vanwege de ongelijke verdeling van kosten en baten. Dan nog is er de vraag over aansprakelijkheid. ‘Stel dat er iets mis zou gaan waardoor een land aanzienlijke schade oploopt, wie wordt er dan aansprakelijk gesteld?’

Over CDR-technologieën is Vellinga positiever, omdat die over het algemeen wel binnen nationale grenzen uitgevoerd kunnen worden zonder een ander land schade te berokkenen. ‘Door meer CO₂ af te vangen, kunnen we de aarde veranderen in een netto *sink* van CO₂ in plaats van een *source*.’ Hij geeft het voorbeeld van biomassa in combinatie met CCS (BECCS). Hierbij wordt vegetatie geplant die tijdens de groei CO₂ opneemt en daarna gebruikt wordt voor energieopwekking. De CO₂ die dan weer vrijkomt, wordt opgevangen en opgeslagen. Op deze manier wordt dus tegelijkertijd energie gecreëerd en CO₂ uit de atmosfeer verwijderd.

Niet over alle CDR-technologieën is Vellinga positief. Versnelde verwerking van olivijn vereist bijvoorbeeld grootschalige mijnbouw. ‘Met dezelfde energie zouden we ook iets anders kunnen doen, zoals ons inspannen voor een transitie naar een duurzamer energiesysteem.’ Ook oceaانبemesting zou volgens Vellinga zonde zijn van onze tijd, omdat de effectiviteit zeer laag is.

Vellinga ziet de noodzaak van klimaatengineering als plan B niet in. Er zijn volgens hem nog vele andere opties die we zouden kunnen gebruiken, zelfs wanneer de nood aan de man komt. Hij ziet kansen voor CCS en een *biobased economy*. ‘We kunnen CO₂ terugdringen tot op het gewenste niveau, waardoor temperaturen ook terug zullen lopen.’



Als het aan Vellinga ligt, moet Nederland zich niet al te veel mengen in de discussie over klimaatengineering en al helemaal niet investeren in onderzoek. 'We kunnen ons geld wel beter besteden, bijvoorbeeld aan de transitie naar een duurzame economie. Mochten we het gevoel hebben dat onderzoek naar klimaatengineering uit de hand dreigt te lopen, dan kunnen we altijd nog aan de bel trekken; daar hebben we internationale instituties voor.'

Klimaatengineering is een brede term, en niet alle technologieën zijn aan elkaar gelijk. Zo heeft Vellinga geen vertrouwen in de praktische uitvoerbaarheid van SRM-technologieën, ook al heeft hij er geen principiële bezwaren tegen. Gezien de risico's van SRM en de geopolitieke problemen, verwacht hij niet dat deze technologieën ooit toegepast gaan worden. CDR-technologieën daarentegen gunt hij wel een kans, ook omdat een deel van die methoden nu al in gebruik zijn (bijvoorbeeld bebossing). Vellinga ziet onze toekomst echter niet zwart in: hij denkt dat een transitie naar duurzame energie niet alleen gewenst, maar ook haalbaar is.



Detlef van Vuuren, klimaatwetenschapper

“SRM alleen in geval van nood”

Detlef van Vuuren werkt als senior onderzoeker op het Planbureau voor de Leefomgeving, sector Klimaat, Lucht en Energie. Hij houdt zich bezig met het modelleren van globale veranderingen in samenhang tot het klimaat. Sinds 2011 is hij ook bijzonder hoogleraar ‘Integrated Assessment of Global Change’ aan het Utrecht Sustainability Institute (Universiteit Utrecht). Door te kijken naar langetermijnsscenario’s onderzoekt hij globale veranderingen en oplossingsrichtingen voor deze veranderingen. Zijn focus hierbij ligt op energie- en mitigatiesystemen.

Detlef van Vuuren: ‘De planeet warmt op, maar er is geen sprake van doemscenario’s of rampzaligheid.’ Verdere klimaatverandering voorkomen is vooral een goed idee omdat dit veel minder kost dan het beperken van de effecten van extra opwarming. De emissiereducties die voor een maximale temperatuurstijging van twee graden zijn vereist, zijn overigens al omvangrijk genoeg. Vooralsnog ziet Van Vuuren pogingen tot zulke reducties niet ontstaan, omdat de huidige visies vooral op de korte termijn zijn gericht in plaats van op de lange termijn. ‘Er zou eerst iets drastisch mis moeten gaan, voordat de urgentie van een snelle oplossing gevoeld wordt.’

Maar is het dan niet al te laat? Hoe zit het met de zogenoemde kantelpunten in het klimaat?

‘Het is duidelijk dat er kantelpunten bestaan op kleine schaal, zoals binnen ecosystemen. Er is minder duidelijkheid over deze kantelpunten op grote schaal. Potentiële kantelpunten die vaak genoemd worden, zijn het verdwijnen van de Amazone en het smelten van de poolkappen. Het risico hierop is aanwezig, maar moeilijk te voorspellen.’

Als we binnen de twee graden opwarming willen blijven, zullen de huidige emissies volgens Van Vuuren met vijftig procent verminderd moeten zijn tegen 2050. Om dit te bewerkstelligen moeten we niet later dan in 2015, 2020 met sterke CO₂-emissiereducties beginnen.

Andere vormen van mitigatie, zoals reductie van ozon en roet, kunnen daarbij ook worden ingezet. Het reduceren van ozon en roet heeft als voordeel dat het een goedkope route is en dat het bovendien voor minder luchtvervuiling zorgt. Daarentegen hebben ozon en roet een korte levensduur, waardoor ze geen alternatief vormen voor het verminderen van de concentratie aan CO₂ in de

atmosfeer. 'Uiteindelijk vormt deze hoge concentratie aan CO₂ het hoofdprobleem. Zelfs als we onmiddellijk zouden stoppen met het uitstoten van CO₂, zou de concentratie in de atmosfeer nog stijgen.'

Is het mogelijk klimaatverandering te voorkomen door middel van mitigatiemaatregelen?

'Vanuit technologisch en economisch perspectief is het klimaatprobleem goed op te lossen. Na COP15 in Kopenhagen heb ik echter het vertrouwen verloren in de internationale klimaatonderhandelingen. We zullen op korte termijn meer paden moeten bewandelen dan alleen het top-down sluiten van verdragen. Er moet meer gebruik gemaakt worden van de innovatiekracht binnen de maatschappij.' Van Vuuren ziet meer in een technologische oplossing dan in gedragsverandering. Maatregelen op het gebied van adaptatie ziet hij eveneens als noodzakelijk, zelfs al zouden we de stijging van de temperatuur van de aarde tot de twee graden-limiet kunnen beperken.

Om het klimaat te stabiliseren moeten we waarschijnlijk toewerken naar negatieve emissies aan het einde van de eeuw. Van Vuuren legt hier een link naar BECCS en herbebossing: volgens hem twee methoden die toegepast zouden kunnen worden om CO₂ uit de atmosfeer te verwijderen. 'Beide methoden worden wel eens als geo-engineering bestempeld, maar dat is niet per definitie het geval. Los van elkaar worden bio-energie en CCS niet als geo-engineering beschouwd, dus waarom in combinatie wel?'

Hij is minder enthousiast over CDR-methoden als ijzerfertilisatie (vanwege grote risico's), AAC (Ambient Air Capture, het fysiek verwijderen van CO₂ uit de lucht) en olivijn (vanwege de hoeveelheid energie die nodig is voor deze technologieën).

Van Vuuren heeft zelf onderzoek uitgevoerd naar SRM, in het bijzonder het in de atmosfeer brengen van sulfaat. Allereerst heeft hij met behulp van een klimaatmodel aangetoond dat zelfs strenge vormen van mitigatie op korte termijn niet tot lagere temperaturen leiden. Bij een onmiddellijk in werking tredend mitigatiebeleid zou het nog steeds vijftig jaar duren voordat er zichtbare effecten optreden. Dit in tegenstelling tot het toevoegen van sulfaat aan de atmosfeer: mondiale temperaturen zouden vrijwel meteen dalen. Daarentegen brengt de sulfaatmethode veel risico's met zich mee: neerslag en temperatuur worden niet gelijkmatig beïnvloed, wat tot regionale verschillen kan leiden. Bovendien doet deze methode – net zoals alle SRM-technologieën – niets aan de verzuring van de oceanen. Om het effect te behouden zou de technologie oneindig toegepast moeten worden en het kan zelfs gevaarlijk zijn om er abrupt mee te stoppen: temperaturen zouden sneller stijgen dan wanneer de technologie niet was ingezet. Vanwege deze problemen vindt Van Vuuren SRM-methoden niet aanvaardbaar. Het is in zijn ogen niet wenselijk om een instabiele aarde te creëren.



Alles tegen elkaar afwegend ('voor zover dat mogelijk is'), zegt Van Vuuren wel dat de risico's van een opwarming van vijf graden waarschijnlijk groter zijn dan de risico's van klimaatengineering. 'Daarom is het verstandig onderzoek te blijven uitvoeren naar de effecten en risico's van geo-engineering.' Hoewel hij tegen de toepassing van SRM blijft, zou de toepassing van SRM een mogelijkheid kunnen zijn om wat tijd te kopen om een extreem mitigatiescenario in werking te stellen. 'Het onderzoek naar SRM kunnen we het beste doen aan de hand van modellen: we hebben op dat gebied nog veel te leren. We moeten echter wel uitkijken dat het onderzoek geen eigen leven gaat leiden, waardoor onderzoek automatisch toepassing betekent.' (Dit staat ook wel bekend als het *slippery slope/runaway science*-argument.)

Experimenten moeten daarom gereguleerd worden, net zoals de eventuele toepassing van klimaatengineering. Hij verwijst hierbij naar het bestaande moratorium op klimaatengineering onder het Biodiversiteitsverdrag (CBD), dat grootschalig onderzoek naar klimaatengineering verbiedt als dit een negatief effect kan hebben op de biodiversiteit.

De discussie over klimaatengineering leeft 'enigszins' in Nederland. 'Het is nog geen veelbesproken onderwerp. Mitigatie en adaptatie staan hoger op de agenda, omdat deze geprefereerd worden boven geo-engineering.' In Groot-Brittannië en in de Verenigde Staten is er sprake van een intensiever debat over geo-engineering, omdat deze landen anders tegenover risico's staan en een ander standpunt hebben over de relatie tussen mens en natuur. 'In Europa zijn we wellicht wat voorzichtiger. Dat neemt niet weg dat ook onze houding ten opzichte van geo-engineering veranderd is ten opzichte van vijf jaar geleden. Het wordt nu serieuzer genomen als optie. Dat is ook nodig: als je het klimaatprobleem serieus neemt, moeten we alle opties open houden.'

Nederland hoeft niet voorop te lopen in onderzoek naar klimaatengineering. 'Daar zijn we te klein voor. Wel zouden we bij lopende initiatieven aan kunnen sluiten, als we daarin een kleine rol aannemen.'

Ron Wit, Natuur & Milieu

“Niet principieel tegen klimaatengineering”

Sinds december 2013 is milieu-econoom Ron Wit directeur Public Affairs van energiebedrijf Eneco. Op het moment dat het interview plaatsvond, was hij hoofd Klimaat en Energie bij de Stichting Natuur & Milieu. De drie hoofdthema's van Natuur & Milieu zijn energie, voedsel en mobiliteit.

Ron Wit is pessimistisch over klimaatverandering. 'Het is twaalf uur. Het is niet meer mogelijk om de opwarming van de aarde onder de twee graden-grens te houden.' Door de economische crisis zal de opwarming wat vertragen, maar Wit verwacht dat het minstens vier tot zes graden warmer zal worden op aarde. Het streven naar wetenschappelijke consensus over klimaatverandering leidt volgens hem tot grote risico's. 'Het duurt te lang om die consensus te bereiken. Het zou van goed risicomanagement getuigen om nu te investeren in grote maatregelen tegen klimaatverandering, omdat die zichzelf zullen terugverdienen.' Dit punt komt echter niet naar voren in het klimaatdebat, net zo min als de vraag welke risico's we als aanvaardbaar zien. 'Bij economische risico's worden er onmiddellijk maatregelen genomen. Met het risico op klimaatverandering wordt heel anders omgesprongen.' Het debat over het al dan niet bestaan van het klimaatprobleem vindt hij 'een onzindiscussie', niet relevant: 'Het debat moet gaan over onze omgang met risico's.'

Volgens Wit worden de noodzakelijke maatregelen niet tijdig genomen. 'Dat gaat ook niet gebeuren als er een paar rampen plaatsvinden, zoals vaak wordt gedacht. Die rampen vinden al plaats, zie de overstromingen in Groot-Brittannië. In de komende twintig jaar zal het vaker gaan stormen. Maar zelfs als die toename statistisch significant is en dus met zekerheid aan klimaatverandering toegeschreven kan worden, zullen er mensen zijn die blijven zeggen dat er geen sprake is van klimaatverandering. We willen het niet weten.'

Alle scenario's wijzen erop dat meer dan een derde van de verminderde CO₂-uitstoot afkomstig moet zijn van energiebesparing. Wit heeft echter geen vertrouwen in de effectiviteit van mitigatiepolitiek. 'De noodzakelijke ingrediënten hiervoor zijn niet aanwezig: energiebesparing is een heel stroperig proces, de financiële middelen voor klimaatbeleid zullen in de komende tien jaar beperkt zijn, en er is wereldwijd nog steeds geen volwassen vorm van CCS.' Noodgedwongen krijgen we volgens Wit straks veel jaren van mitigatie, maar ook van adaptatie, in brede zin: 'Niet alleen hogere dijken, maar misschien ook het instellen van een tijdelijk vangnet met vormen van klimaatengineering.'



Wit maakt hierin een onderscheid tussen CDR en SRM. 'CDR is duur maar heeft weinig neveneffecten. SRM is goedkoper dan CDR, maar heeft meer neveneffecten, die weer andere milieuproblemen kunnen veroorzaken.' Bij een keuze voor toepassing moet volgens Wit een integrale afweging worden gemaakt met betrekking tot de kosten, de effectiviteit en ook het tijdseffect van de maatregelen. Wat het tijdseffect betreft, moet er meer bekend worden over het effect van klimaatengineering op de opwarming in de tijd. 'Pas dan kunnen conclusies worden getrokken over toepassing. Hoe snel gaan klimaateffecten optreden en welke maatregelen zijn hier passend bij?'

Ron Wit staat 'pragmatisch' in de discussie over klimaatengineering. Veel ngo's willen maatregelen beperken tot het aanpakken van de bron van opwarming: de uitstoot van CO₂. Die uitstoot moeten we volgens Wit inderdaad beperken, maar tegelijkertijd moet er iets gebeuren aan de al aanwezige hoeveelheid CO₂. 'Huidige mitigatiemaatregelen schieten als gezegd tekort, daarom kunnen we het ons niet veroorloven te principieel te zijn.' Wit vindt dat er meer onderzoek moet plaatsvinden naar de kosten, risico's en tijdsaspecten van klimaatengineering, eventueel uitgevoerd door de overheid. Zolang het grootste deel van de financiering naar mitigatie gaat, wat ook bij toepassing van klimaatengineering noodzakelijk blijft, ziet hij geen probleem in het met publiek geld financieren van klimaatengineering. Hij erkent wel het moral hazard-dilemma: aandacht voor en financiering van klimaatengineering kan ten koste gaan van mitigatie. 'Het risico bestaat dat de Verenigde Staten klimaatengineering gaat inzetten in plaats van mitigatiemaatregelen, als klimaatengineering goedkoper zou blijken te zijn.'

Wit heeft evenmin bezwaar tegen de commerciële toepassing van klimaatengineering. 'Waarom zouden bedrijven wel geld mogen verdienen aan de productie van medicijnen en hieraan niet?' Hij maakt hierbij geen onderscheid tussen CDR en SRM. 'We moeten geen enkele mogelijke maatregel bij voorbaat uitsluiten.' Klimaatengineering moet volgens Wit gereguleerd worden door middel van internationale verdragen, net als bij andere maatschappelijke issues als genetisch gemodificeerde organismen en landbouwgif.

In het Nederlandse klimaatdebat speelt het onderwerp klimaatengineering volgens Wit vooralsnog geen rol. 'Af en toe komt het onderwerp olivijn op, een vorm van CDR. Dat is al snel controversieel, omdat aandacht voor olivijn veronderstelt dat het klimaatprobleem urgent is en dat er daadwerkelijk iets aan moet gebeuren. Dat ligt problematisch in Nederland. Eerst moet er iets aan de negatieve toon van het debat gebeuren.'

4 Ethische vragen rond klimaatengineering

Marcus Düwell, Annemarie Bijloos, Vincent van Gool

4.1 Inleiding

Ook in het laatste rapport blijft het IPCC bij de prognose dat de gemiddelde temperatuur tot het eind van deze eeuw tussen de 1,5 en 4,5 graden zal stijgen (IPCC 2013). En dit zou nog wel eens een conservatieve inschatting kunnen zijn, omdat de uitstoot van broeikasgassen sterker en sneller toeneemt dan in de modellen waar het IPCC in zijn berekeningen van uitgaat.

Volgens The Royal Society zullen de gevolgen van verdere opwarming groot, ernstig en oneerlijk verdeeld zijn (The Royal Society 2009). Denk hierbij aan negatieve effecten op gezondheid, veiligheid, leefomgeving, voedselproductie en watervoorzieningen. The Royal Society heeft een voorkeur voor mitigatie, maar merkt tegelijkertijd op dat de haalbaarheid van internationale CO₂-reductiedoelstellingen steeds verder afneemt. Weliswaar nam het gebruik van niet-fossiele brandstoffen tussen 2000 en 2010 met 25 procent toe, maar daar stond alleen al een groei van 45 procent tegenover van de energiewinning uit kolen. En die is in volume veel groter dan de energiewinning uit niet-fossiele brandstoffen (EurActiv 2013).

Maria van der Hoeven, voorzitter van het International Energy Agency (IEA), heeft dan ook gezegd dat het energiesysteem van de aarde tot een breekpunt gedreven wordt. Wat zij beschrijft als 'onze verslaving aan fossiele brandstoffen' wordt volgens het IEA ieder jaar erger. In lijn daarmee zou ook een gemiddelde temperatuurstijging van zes graden een denkbaar scenario zijn (Harvey & Carrington 2012).

Als de situatie zo ernstig is, kun je je afvragen waarom de ontwikkeling en toepassing van klimaatengineering moreel ter discussie staat. En toch is dat het geval. Dit hoofdstuk begint met een bespreking van de belangrijkste ethische discussiepunten die tot nu toe een rol hebben gespeeld in het denken over klimaatengineering. Het hoofdstuk sluit af met vier ethische richtlijnen voor toekomstig beleid.

4.2 Zijn de intenties achter klimaatengineering moreel juist?

4.2.1 Klimaatengineering als noodscenario

Mitigatie en adaptatie zijn tot nu toe de veiligste en voorspelbaarste methoden om de opwarming van de aarde (en de ongewenste gevolgen daarvan) te bestrijden. Maar het zijn niet de methoden gebleken die zich het makkelijkst laten realiseren. Daardoor lijkt het misschien alsof de mensheid voor de volgende keuze staat: ofwel steven we met zijn allen op een klimaatramp af, ofwel kiezen we voor klimaatengineering.

Over de effecten en risico's van de verschillende technologieën die onder klimaatengineering vallen, bestaat echter nog veel onzekerheid. Het is daarom nog maar de vraag in hoeverre de technologie de verwachtingen kan inlossen.

De inzet op klimaatengineering lijkt daarom alleen verantwoord te kunnen worden als een plan B, een noodscenario dat we moeten ontwikkelen om onszelf en toekomstige generaties voor te bereiden op uit de hand gelopen klimaatproblemen. Gezien de omvang en de hardnekkigheid van de problematiek lijkt het echter niet zo waarschijnlijk dat pleitbezorgers van onderzoek naar klimaatengineering dit werkelijk slechts als een plan B voor noodsituaties zien.

De ontwikkeling van klimaatengineering als mogelijk hulpmiddel om verdere antropogene klimaatverandering tegen te gaan, wordt door meerdere voor-
aanstaande klimaatwetenschappers gesteund (Rasch, Crutzen & Coleman 2008; Matthews & Caldeira 2007). De RAND Corporation (een internationale denktank) ziet drie voordelen in een overwegend technologische oplossing als klimaatengineering: het heeft snel effect, is relatief goedkoop (in vergelijking met andere methoden), en internationale samenwerking is niet per se vereist (Lempert & Prosnitz 2011).⁸ Het voordeel van met name Solar Radiation Management (SRM) is dus dat het verdere opwarming sneller, effectiever en goedkoper zou kunnen beperken, in vergelijking met mitigatie (Thernstrom 2010).

Daarbovenop komt het 'plan B-argument': wie klimaatengineering nu als alternatief verwerpt, beschikt over onvoldoende technische kennis als een technologische oplossing de enige uitweg uit het klimaatprobleem blijkt te zijn (MacCracken 2009). Volgens sommige klimaatwetenschappers maakt het naderen van bepaalde kantelpunten in het klimaatsysteem een effectieve en snelle technologische oplossing inderdaad urgent. Een aantal van deze klimaat-

8 Hierbij moet worden opgemerkt dat het daadwerkelijk optreden van deze verwachte voordelen aanzienlijk verschilt per technologie, en dat succes afhankelijk is van daadkrachtige toepassing. Ook moet nader onderzocht worden of het argument dat klimaatengineering goedkoper is dan mitigatie en adaptatie standhoudt wanneer het wordt afgezet tegen het risico op ongewenste neveneffecten en een mogelijk oneerlijke verdeling van de kosten (Keith 1998).

wetenschappers heeft zich verenigd in de Arctic Methane Emergency Group (AMEG). Volgens AMEG is een catastrofe onvermijdelijk als klimaatengineering niet op korte termijn wordt ingezet om de Noordpool af te koelen (AMEG 2013), omdat een ijsvrije Noordpool tot een serie nieuwe kantelpunten zou kunnen leiden (Duarte et al. 2012). Volgens AMEG zijn acute, mogelijk oncontroleerbare veranderingen in het klimaat tegen te houden als klimaatengineering tijdig wordt toegepast (MacCracken 2009).

4.2.2 Angst voor 'moral hazard'

Het op korte termijn ontbreken van een haalbaar alternatief kan ertoe leiden dat klimaatengineering als de enig mogelijke oplossing van het klimaatprobleem wordt gepresenteerd. Er wordt dan een beroep gedaan op het *climate-necessity argument*, zoals Kristin Shrader-Frechette⁹ het heeft genoemd. Volgens haar wordt een dergelijke argumentatie ingezet om het gebruik van kernenergie te rechtvaardigen (Shrader-Frechette 2011, p. 53).

Hoewel de doelstelling om verdere opwarming van de aarde tegen te gaan breed gedragen wordt, zijn er ook mensen die bang zijn dat klimaatengineering die doelstelling eerder ondergraaft. De inzet op de ontwikkeling van dergelijke technologieën, zo redeneren zij, ontnemt het zicht op de oorzaak van het klimaatprobleem. Ze bieden ons als het ware de kans om onze huidige levensstijl voort te zetten. En dat zou de ware reden zijn voor een enthousiaste benadering van klimaatengineering.

In het artikel '20 reasons why geoengineering may be a bad idea' gaat meteoroloog Alan Robock hierop in: 'If humans perceive an easy technological fix to global warming that allows for "business as usual", gathering the national (particularly in the United States and China) and international will to change consumption patterns and energy infrastructure will be even more difficult' (Robock 2008, p. 17). Het ontwikkelen en implementeren van klimaatengineering leidt dan de aandacht af van datgene waar zowel de politiek als de wetenschap nu alle aandacht op moet richten: het effectief en grootschalig terugdringen van de uitstoot van broeikasgassen. Als een makkelijke technologische oplossing voorhanden lijkt te zijn, wordt het erg moeilijk om de nationale en internationale wil te vinden voor de aanpassing van consumptiepatronen en voor het ontwikkelen van een nieuwe infrastructuur voor energievoorzieningen.

We hebben hier te maken met wat bekend staat als het *moral hazard*-dilemma: een vals gevoel van veiligheid dat tot risicovol gedrag leidt (IPCC 2012, p. 524). Uit angst voor het creëren van moral hazard zijn veel wetenschappers terughoudend in de agendering van klimaatengineering: het zou overheden kunnen aanmoedigen om niet langer in te zetten op het terugdringen van de uitstoot

9 Hoogleraar filosofie en biologie, University of Notre Dame, Indiana.

van broeikasgassen. Klimaatengineeringsprojecten zullen daarom met argus-ogen bekeken worden als landen die hier geld in stoppen niet óók investeren in een flinke vermindering van hun broeikasgasemissies (Victor et al. 2009).

Hoewel weinig wetenschappers klimaatengineering als een alternatief voor de reductie van emissies zien, zijn sommigen van hen bang dat de belofte die klimaatengineering mogelijk te bieden heeft, een eigen leven zal gaan leiden in een wereld die grotendeels in het teken staat van het marktdenken (Buck 2012, pp. 259-260). Beleidsmakers zouden kunnen denken dat klimaatengineering nog een 'extra ronde' aan groei mogelijk maakt. Er zou tijd gewonnen kunnen worden om gevestigde zakenbelangen nog even voorrang te geven (Gardiner 2010, p. 284).

4.2.3 'Technological fix' is immoreel

Volgens de filosoof Stephen Gardiner is de intentie om klimaatverandering tegen te gaan door middel van klimaatengineering immoreel. Het getuigt volgens hem van morele corruptie om de mensheid voor te bereiden op een doemscenario waarvoor zij zelf de voorwaarden schept. De klimaatverandering is immers door de mens gecreëerd, en wordt ook door de mens in stand gehouden. Sommigen ontkennen of negeren het hele probleem, anderen proberen het met technologische middelen te bestrijden. Volgens Gardiner wordt het probleem dan bestreden met de oorzaak zelf (Gardiner 2010).

Gardiner stelt dat een *technological fix* als klimaatengineering een daadwerkelijke uitkomst uit de klimaatcrisis in de weg staat. Nu valt natuurlijk te betwisten of Gardiner de mensheid mag beschouwen alsof het om een individueel handelende persoon gaat, die in zijn eentje problemen schept en oplossingen verzint. Er bestaat per slot van rekening niet zoiets als een mondiale vorm van menings- en besluitvorming. Maar zijn centrale vraag wordt daardoor niet aangetast: is het moreel verantwoord om de oplossing van het klimaatprobleem in een technologische compensatie van de gevolgen van ons handelen te zoeken, en daarbij niets aan ons consumptiegedrag te veranderen? Dit argument zal nader worden besproken in paragraaf 4.4.2.

4.2.4 Klimaatverandering op zichzelf tegengaan: uiteenlopende motieven

Tot nu toe zijn de intenties achter de toepassing van klimaatengineering besproken. Daar gaat echter nog iets aan vooraf, namelijk de vraag waarom je klimaatverandering op zichzelf zou willen tegengaan. Hier kunnen verschillende beweegredenen voor bestaan.

Het motief kan puur economisch zijn: het is goedkoper om nu in te grijpen dan het in de toekomst zal zijn, en het is ook goedkoper om de gevolgen van de opwarming te bestrijden dan om ons aan die gevolgen aan te passen. De bestrijding van klimaatverandering kan ook gemotiveerd worden vanuit het idee dat we het moreel verplicht zijn om toekomstige generaties een leefbare

wereld na te laten. Tot slot vinden sommige milieuorganisaties dat we klimaatverandering tegen moeten gaan omdat het een voorbeeld bij uitstek is van onze complete instrumentalisering van de aarde en van onze natuurlijke omgeving. Als we de natuur een van de mens onafhankelijke waarde toekennen en ervan uitgaan dat de mens de natuur hoort te respecteren, dan is het uitputten van de natuur, of het gebruiken van de natuur als slechts een middel, niet te rechtvaardigen.

De eerste twee redenen om klimaatverandering tegen te gaan, namelijk dat het economisch winstgevend is en dat we bepaalde verplichtingen hebben ten opzichte van toekomstige generaties, zouden kunnen vragen om het toepassen van klimaatengineering. De laatstgenoemde reden, namelijk het tegen gaan van een volledige instrumentalisering van de natuur, roept daarentegen ethisch veel vragen op (zie paragraaf 4.4.3).

4.3 Is klimaatengineering geoorloofd als je de gevolgen niet kent?

Veel is onbekend over de interacties tussen het klimaat en de verschillende ecosystemen op aarde. Door deze hiaten in kennis zijn de mogelijke gevolgen van klimaatengineering niet volledig voorspelbaar (Lovelock 2008). Ingrijpen in het complexe klimaatsysteem kan onvoorziene schadelijke gevolgen hebben, die misschien onherstelbaar zijn. Geld steken in de toepassing van technologieën waarvan de haalbaarheid en duurzaamheid onzeker zijn, zou dus van naïviteit en roekeloosheid kunnen getuigen. Verder onderzoek is gewenst om een adequate wetenschappelijke basis te verkrijgen. Zo stelt BBC-milieu-correspondent Richard Black dat we hier met een technologie te maken hebben die een grote hoeveelheid gecontroleerd onderzoek vereist voordat die mag worden losgelaten op de natuurlijke wereld (Black 2010).

Dat er nog weinig kennis beschikbaar is over de mogelijke gevolgen van klimaatengineering, wordt erkend in een rapport van de United States Government Accountability Office uit 2010. Hierin wordt gesteld dat alle varianten nog onderontwikkeld zijn (GAO 2010). Wie met dergelijke onzekerheden geconfronteerd wordt, zou zich het liefst eerst willen richten op zorgvuldig en uitgebreid onderzoek, om pas daarna een besluit te nemen over de toepassing van de technologie. Maar hier dient zich een dilemma aan.

4.3.1 Grootschalig experimenteren valt samen met toepassen

De kennis die nu voorhanden is over klimaatengineering komt voornamelijk voort uit observatie van natuurlijke fenomenen, kleinschalige laboratoriumtesten en computermodellen. Klimaatengineering, en dan met name SRM, heeft echter pas een wezenlijk effect op het mondiale klimaat als het grootschalig wordt toegepast. Met experimenten op kleine schaal komt de invloed op het hele klimaatsysteem niet aan het licht, en het beïnvloeden daarvan is nu

juist het doel van klimaatengineering. Dit maakt het vrijwel onmogelijk om met klimaatengineering te experimenteren. Het testen moet grootschalig gebeuren, waardoor het testen samenvalt met toepassen.

Het zijn geen 'foutvriendelijke technologieën'. In wetenschappelijke of technologische context wordt 'foutvriendelijkheid' geïnterpreteerd als de mogelijkheid om te leren van gemaakte fouten. Experimenten vinden plaats in een geïsoleerde setting, en de toepassing wordt stapsgewijs doorgevoerd. Het op deze manier kunnen leren van fouten is gebonden aan twee condities: je moet risico's durven nemen, maar die risico's moeten niet zo groot en onvoorspelbaar zijn dat een fout meteen fatale gevolgen zou hebben (Weizsäcker 1984). En dat laatste is, zoals gezegd, problematisch bij klimaatengineering. In een kleinschalige experimentele setting zou een onvoorziën schadelijk effect beperkt blijven. Bij het op grote schaal testen en dus toepassen van klimaatengineering kunnen negatieve onvoorziene gevolgen aanzienlijk meer schade aanrichten.

4.3.2 Het voorzorgprincipe

Volgens het voorzorgprincipe is terughoudendheid geboden als er onvoldoende kennis is om te kunnen beoordelen of een bepaalde handeling of ingreep ernstige of onomkeerbare schade zal veroorzaken (The Wingspread Conference 1998). Als er nog weinig bekend is over de ingreep zelf en de mogelijke gevolgen ervan, stelt het voorzorgprincipe dat hier eerst zorgvuldig en uitgebreid onderzoek naar gedaan moet worden. Vanuit het voorzorgprincipe bekeken is klimaatengineering een problematische onderneming. Het ingrijpen in een complex en deels onbekend systeem als dat van het klimaat kan onvoorspelbare en onherstelbare effecten hebben. Hoe slechter men deze effecten kan overzien, hoe problematischer een vorm van ingrijpen is die grootschalig en onomkeerbaar is.

Het vroegtijdig toepassen van klimaatengineering is daarmee een technologisch waagstuk, en volgens sommigen geldt dat ook al voor het ontwikkelen van de verschillende technologieën. De ETC Group (Action Group on Erosion, Technology and Concentration), een internationale organisatie die zich inzet voor mensenrechten en culturele en ecologische diversiteit, komt tot de conclusie dat het voorzorgprincipe leidt tot het afwijzen van dergelijke projecten: 'Opting for geoengineering flies in the face of precaution. Even those who would like to see large-scale investment in the field are quick to acknowledge that we do not know enough about the Earth's systems to risk real-world geoengineering experiments' (ETC Group 2010).

Bepaalde technologieën brengen daarbij bovendien specifieke risico's met zich mee. Zo bestaat er rond Solar Radiation Management onzekerheid over de gevolgen van koeling in combinatie met een stijgende CO₂-concentratie. Bij Carbon Dioxide Removal (CDR) is onduidelijk welke gevolgen een grootscha-

lige toepassing en mogelijke beëindiging heeft. Daarnaast zijn sommige CDR-technologieën afhankelijk van opslagmogelijkheden die hun eigen risico's met zich mee kunnen brengen.

4.3.3 Het voorzorgprincipe: vrijbrief om niet te hoeven handelen?

Wie klimaatengineering afwijst op basis van het voorzorgprincipe, loopt wel een risico. Namelijk dat hij over onvoldoende kennis beschikt op het moment dat een technologische oplossing de enige uitweg uit het klimaatprobleem zou blijken te zijn. Het voorzorgprincipe is dan ook niet onomstreden. Meerdere auteurs betogen dat het voorzorgprincipe impliciet een romantisch ideaal van een technisch onaangetaaste natuur veronderstelt (bijvoorbeeld Brom 2011, p. 13). Ook zou het handelen vanuit het voorzorgprincipe tot nietsdoen kunnen leiden.

Het gaat er bij het voorzorgprincipe eerder om dat bij veel vormen van technisch ingrijpen een bepaalde mate van voorzorg nodig zal zijn. Er zijn namelijk altijd onzekerheden die een simpele afweging van risico's onmogelijk maken. Het voorzorgprincipe is echter nog niet goed uitgewerkt binnen ethiek en recht. Met een uitgewerkte theorie zou je grenzen kunnen aangeven voor legitieme vormen van ingrijpen, of zou je kunnen aangeven welke mate van onzekerheid met welk niveau van voorzorg overeen zou moeten komen. Operationalisering van het voorzorgprincipe is dus nodig. Dat neemt niet weg dat we bij morele beoordelingen in ogenschouw moeten nemen dat we vaak in situaties handelen waarin de handelingsgevolgen onbekend zijn. In deze situaties is voorzorg nodig.

4.3.4 Is klimaatengineering van een fundamenteel andere orde?

Is het verschil tussen klimaatengineering en andere vormen van ingrijpen in de natuur slechts graduëel, of is het van een fundamenteel andere orde? Volgens de milieuwetenschapper James Lovelock is de mens al een 'geo-ingenieur' sinds hij vuur wist te maken: 'Acts [of geoengineering] have led the Earth to evolve to its current state. As a consequence, most of us are now urban and our environment is an artifact of engineering. During this long engineering apprenticeship, we changed the Earth, but until quite recently [...] we were unaware that we were doing it, still less the adverse consequences' (Lovelock 2008). Lovelock ziet geen fundamenteel verschil tussen klimaatengineering en andere vormen van natuurbeheersing. Volgens hem is het ingrijpen in en het besturen van natuurlijke processen, waaronder het klimaat, geen activiteit van een geheel nieuwe orde. Klimaatengineering is dan niet meer dan de volgende stap in de relatie tussen mens en natuur.

In deze redenering kan niet iedereen hem zonder meer volgen. De vraag of het om een fundamenteel nieuwe vorm van ingrijpen gaat, vloeit voort uit twee aspecten. Ten eerste neemt klimaatengineering de belangrijkste oorzaak van het klimaatprobleem niet weg (Fleming 2012). Dit wordt verder besproken in

paragraaf 4.4.2. Ten tweede heeft het te maken met het grootschalige karakter van klimaatengineering.

Grootschaligheid

Het meeste wetenschappelijke onderzoek vindt plaats in de Verenigde Staten en Groot-Brittannië (zoals vastgesteld in hoofdstuk 2). Er zijn nog maar weinig overheden daadwerkelijk betrokken bij onderzoek naar klimaatengineering (Bracmort, Lattanzio & Barbour 2010). Dit komt niet alleen door het gebrek aan wetenschappelijke zekerheid, maar ook omdat klimaatengineering op dezelfde beleidsproblemen stuit als mitigatie en adaptatie.

Ten eerste vraagt klimaatengineering om grootschalige uitvoering, waarvoor met name in het geval van SRM internationale samenwerking nodig is. Daarnaast verwachten wetenschappers dat het toepassen van SRM significante grensoverschrijdende effecten zal hebben. Deze kunnen de wenselijkheid van het inzetten van klimaatengineering sterk beperken. Onder de huidige internationale wetgeving kan een staat namelijk wel de eenzijdige beslissing nemen om klimaatengineering toe te passen. Ze is echter alleen wettelijk aansprakelijk voor gevolgen waarvan kan worden aangetoond dat ze door klimaatengineering zijn veroorzaakt. Dit is een moeilijke, vaak onmogelijke opgave (Weiss 1978).

Als onderzoek naar of toepassing van klimaatengineering daadwerkelijk wordt overwogen, zullen beleidsmakers op nationaal en internationaal niveau het hoofd moeten bieden aan de potentiële gevolgen en zich dus over de politieke regulering van onderzoek en implementatie moeten buigen.

De potentiële uitvoering van klimaatengineering moet vanuit het perspectief van verantwoordelijkheid en rechtvaardigheid worden bekeken. Misschien ligt de verantwoordelijkheid voor de kosten, de ontwikkeling en uitvoering van klimaatengineering bij de rijke landen. Zij hebben in het verleden al de kans gekregen om zich te ontwikkelen, iets waar arme landen nu pas aan toekomen.

Een transparante, effectieve en universeel geldende regeling moet garanderen dat klimaatengineering niet de onrechtvaardigheid en ongelijkheid verscherpt die klimaatverandering juist veroorzaakt. Ook moet een dergelijke regeling het gebruik van klimaatengineering voor verwerpelijke doeleinden voorkomen, zoals het voeren van klimaatoorlogen, of misbruik in andere conflictsituaties (James Martin Geoengineering Ethics Working Group 2010).

Het belang van de esthetische natuurervaring

Het toepassen van beïnvloedingstechnologieën op globale schaal roept vragen op over het ontwikkelingspotentieel van de mens, en de menselijke relatie tot de natuur. Heeft de mens de morele autoriteit om de natuur op deze schaal te manipuleren? Welke gevolgen heeft een radicale instrumentalisering van de natuurlijke omgeving voor onze beleving ervan? Hoe begrijpen wij

onzelf in relatie tot de natuur, en heeft onze omgeving een bepalende invloed op ons mensbeeld? Welke psychologische effecten kan het veranderen van het leefmilieu hebben op het menselijk bewustzijn? Dit zijn de meer theoretisch-filosofische vragen die klimaatengineering oproept. Ze staan nog los van de relevante en prangende vragen die voortkomen uit de toegepaste ethiek.

4.4 Ethische richtlijnen voor toekomstig beleid rond klimaatengineering

4.4.1 De governance van klimaatengineering

In de bespreking van de belangrijkste normatieve vraagstukken rond klimaatengineering is duidelijk geworden dat het een project vol ethische vragen is, die om nader onderzoek vragen. Ten eerste zou SRM moreel problematisch zijn als het langdurig en grootschalig wordt toegepast op een manier die niet omkeerbaar is, terwijl we de gevolgen ervan niet kunnen overzien. Als de toepassingen gefaseerd kunnen worden toegepast en omkeerbaar zijn, weegt dit punt minder zwaar. Omgekeerd: hoe minder dit het geval is, hoe groter het bezwaar.

Een tweede belangrijk punt van onderzoek is de vraag welke institutionele voorwaarden nodig zijn om een grootschalige toepassing van klimaatengineering überhaupt mogelijk te maken. Dit punt is zowel relevant voor de coördinatie van zo'n project als voor de garantie van een langdurige toepassing. Want welke effecten zou klimaatengineering kunnen hebben als een gecoördineerde toepassing nu of in de toekomst niet gegarandeerd kan worden?

Hiermee samen hangen de vragen in hoeverre politieke instituties kwetsbaar worden door de noodzaak tot een gecoördineerde aanpak, en in hoeverre nieuwe afhankelijkheidsrelaties kunnen ontstaan. Het gaat dus niet alleen om een empirisch probleem (in hoeverre kunnen we de gevolgen überhaupt overzien?), maar ook om een normatief vraagstuk: in welke mate is het moreel aanvaardbaar om politieke instituties zo kwetsbaar te maken?

Dit punt is relevant, omdat de meeste wetenschappers klimaatengineering als een noodscenario zien dat pas in aanmerking komt als andere oplossingen onhaalbaar zijn gebleken. Dus pas als we op politiek en maatschappelijk niveau gefaald hebben, komt klimaatengineering in beeld. Zullen diezelfde politieke instituties dan wel in staat zijn om beleid te ontwikkelen voor klimaatengineering? Als klimaatengineering een hoge mate van politieke coördinatie en doorzettingsvermogen vereist, en we ervan uit moeten gaan dat dit scenario pas relevant wordt in situaties waarin dit vermogen er overduidelijk niet is, roept dit ethisch vele vragen op.

4.4.2 De communicatie over klimaatengineering: hoe voorkom je moral hazard?

Zoals gezegd zijn de effecten en risico's van klimaatengineering onbekend, waardoor het nog maar de vraag is of deze technologieën kunnen bijdragen aan het oplossen van het klimaatprobleem. Bij gebrek aan een haalbaar alternatief wordt klimaatengineering gerechtvaardigd met een beroep op het *climate-necessity argument*: klimaatengineering is noodzakelijk om klimaatverandering te beperken. De filosoof Stephen Gardiner verwerpt deze argumentatie, waardoor klimaatengineering wordt gepresenteerd als 'het minste kwaad' (Gardiner 2010). Het getuigt volgens hem van morele corruptie om de mensheid voor te bereiden op een doemscenario dat zij zelf zal creëren. Door het probleem te bestrijden met technologische middelen, wordt het bestreden met de oorzaak zelf. Gardiner meent dat een dergelijke *technological fix* een daadwerkelijke weg uit de klimaatcrisis belemmert.

Misschien is Gardiner iets te radicaal in zijn conclusie. Misschien is het inderdaad noodzakelijk om klimaatengineering te ontwikkelen, al was het maar om voorbereid te zijn als alternatieven niet succesvol blijken. Dat neemt niet weg dat Gardiner een belangrijk punt aansnijdt. Welk signaal geeft de politiek eigenlijk aan de bevolking af op het moment dat er voor de ontwikkeling van klimaatengineering wordt gekozen? Is dat de boodschap dat een milieuramp onvermijdelijk is, dat wij ons daarbij neer moeten leggen en dat we de gevolgen ervan moeten compenseren? Wordt daarmee gecommuniceerd dat veranderingen in levensstijl en veranderingen in het gebruik van natuurlijke hulpbronnen niet meer nodig zijn?

Als dit zo zou zijn, zou dit vanuit meerdere gezichtspunten moreel problematisch zijn. Zo is het onmogelijk om nu te overzien of klimaatengineering daadwerkelijk het gewenste resultaat teweeg kan brengen. Bovendien is het onwaarschijnlijk dat technologische oplossingen afdoende zullen zijn zonder dat er tegelijkertijd een gedragsverandering plaatsvindt.

Dus zelfs als klimaatengineering technologisch succesvol blijkt, kan de manier waarop de keuze voor klimaatengineering gebracht wordt problematisch zijn. De vraag moet daarom zijn: bevordert klimaatengineering een eenzijdige fixatie op een specifieke oplossing van het klimaatprobleem? Als dat het geval is, zou het niet alleen de ontwikkeling van een duurzame levensstijl tegenwerken, maar ook de technologiepolitiek eenzijdig bepalen. Hier is uitgebreidere discussie vereist.

4.4.3 Kan de mens leven zonder esthetische natuurervaringen?

De grootschalige, mondiale en langdurige toepassing van klimaatengineering leidt tot een reeks fundamentele vragen rond mensbeeld en antropologie. Voor velen lijkt klimaatengineering een strategie die de instrumentalisering van de natuur op de spits drijft, een dieptepunt in onze onderdrukking van de

natuur. Sterker nog, het onderscheid tussen natuur en cultuur, dat in vele opzichten al twijfelachtig geworden is, lijkt dan volledig weggevaagd te worden. Het lijkt een poging om onze controle over de natuur compleet te maken.

Hier valt tegenin te brengen dat de effecten van klimaatengineering te onzeker zijn om de natuur volledig te kunnen beheersen. Dat neemt niet weg dat klimaatengineering wel met die *intentie* geïntroduceerd zou kunnen worden. Nu kun je je afvragen wat daar dan mis mee is. Waarom zou je bezwaar hebben tegen een volledige beheersing van de natuur door de mens, als je niet een of andere romantische opvatting van de natuur aanhangt?

De vraag 'voor of tegen klimaatengineering' zou van allerlei voorkeuren en levensbeschouwelijke vragen kunnen afhangen: wel of geen voorstander van 'wilde' natuur, wel of geen natuurliefhebber, enzovoort. Als de discussie een dusdanig karakter zou hebben, zou er in een liberale maatschappij geen principiële reden bestaan om terughoudend te zijn in de ontwikkeling van klimaatengineering. Weliswaar zou er in de politieke besluitvorming rekening gehouden moeten worden met de voorkeuren van de meerderheid van de burgers, maar het introduceren van deze technologieën zou niet op fundamentele bezwaren stuiten.

Het is echter de vraag of dit klopt. Als we ervan uitgaan dat klimaatengineering in de vorm van SRM alleen zinvol is op mondiale schaal, en dat de introductie niet zonder grote problemen teruggedraaid kan worden, dan wordt er wel degelijk een fundamenteel nieuwe stap gezet in het controleren van de natuur. Zouden er dan toch geen redenen zijn om vast te houden aan het onderscheid tussen natuur en cultuur? De natuur is in cultureel opzicht buitengewoon belangrijk. De ervaring van de natuur als 'vrij van cultuur en urbaniteit', metaforen van de natuur als spiegel van de ziel en de bijzondere rol van de natuur in de schilderkunst tonen dit aan. Met name in de moderne tijd speelt dit aspect regelmatig een grote rol in discussies over ons zelfbeeld als mensen die niet volledig samenvallen met hun maatschappelijke rol.

Het bijzondere aan de natuur is dat die als mooi, rustgevend, subliem en adembenemend ervaren kan worden, terwijl dat esthetische effect geen resultaat van planning is. Kunst is bedacht, natuur niet: de onvoorspelbaarheid van natuurverschijnselen en het gebrek aan planning is juist een kenmerkend aspect van de esthetische ervaring van de natuur. Hierbij is het niet relevant of de natuur 'echt' wild is; zoiets bestaat in elk geval in Nederland niet meer. Het gaat erom dat de mens de ruimte krijgt om de natuur als esthetisch waardevol te beleven zonder dat deze ervaring gestuurd wordt. Als we de wereld veranderen in een *global Manhattan*, verdwijnt er een unieke bron van esthetische ervaringen, die belangrijk is voor een goed zelfbegrip van de mens. Deze antropologisch-ethische overwegingen zijn van een volledig andere aard dan de overweging dat de mens respect hoort te hebben voor de natuur, of dat de

natuur rechten heeft die wij horen te respecteren. Het gaat puur om de relevantie van esthetische natuurervaringen voor de mens zelf.

4.4.4 Keuzevrijheid voor volgende generaties

Klimaatengineering is een technologie waarvan de toepassing onomkeerbaar is, terwijl de effecten ervan onzeker zijn. Hiermee nemen we een besluit dat toekomstige generaties niet kunnen terugdraaien. Dit aspect is op zich niet specifiek kenmerkend voor klimaatengineering, denk bijvoorbeeld aan het produceren van kernafval, of aan klimaatverandering in het algemeen. Deze vraag speelt echter juist ook bij klimaatengineering.

Nu is het in de ethiek omstreden wat onze verplichtingen ten opzichte van toekomstige generaties zijn. Volgens de Universele Verklaring van de Rechten van de Mens is respect voor de waardigheid en de rechten van alle mensen het centrale uitgangspunt. Dat betekent dat wij de plicht hebben om de mogelijkheid tot een eigen, autonoom leven voor alle mensen te beschermen. Wat dit ten opzichte van toekomstige generaties inhoudt, is onduidelijk. Wij weten immers in veel opzichten niet hoe ons handelen hun leefsituatie beïnvloedt, onder welke omstandigheid zij feitelijk zullen leven en hoe zij willen leven. Maar als we de voorwaarden voor een zelfbepaald leven voor alle mensen willen beschermen, moeten we op zijn minst de ecologische randvoorwaarden voor toekomstig leven in stand houden. Dit betekent dat alle handelingen die onze ecologische omgeving onomkeerbaar veranderen en waarvan wij de gevolgen moeilijk kunnen overzien, om een sterke rechtvaardiging vragen.

4.5 Conclusie

Onder welke voorwaarden zou klimaatengineering, en met name SRM, een verantwoorde optie kunnen zijn? Deze voorwaarden hebben met name te maken met drie kenmerken van klimaatengineering:

- Het betreft een technologie die alleen effectief kan worden ingezet als dit op een *grootschalig* niveau gebeurt.
- Het is door *irreversibele* effecten verbonden met de natuur.
- Over de *gevolgen op lange termijn* kan weinig worden gezegd.

Omdat het om een intentioneel en grootschalig invoeren van een type technologie gaat, zijn met name vragen over verantwoordelijkheid van belang.

Institutionele voorwaarden

Een grootschalige technologie als SRM kan alleen op een verantwoorde manier worden ingevoerd als de internationale gemeenschap dit goed weet te organiseren. De onomkeerbaarheid ervan vraagt immers om langdurige mondiale coördinatie. Het valt te betwijfelen of er aan deze voorwaarde kan worden voldaan. Klimaatengineering wordt als een noodscenario gezien: het is pas aan

de orde als alle andere oplossingen hebben gefaald. Zou de internationale gemeenschap het dan wél voor elkaar krijgen om met succes een grootschalige toepassing van klimaatengineering te coördineren? Het debat zou daarom eerst moeten gaan over de vraag welke institutionele voorwaarden nodig zijn om klimaatengineering succesvol te kunnen sturen, en effectief te kunnen reageren op fouten.

Beleid om moral hazard te voorkomen

Het is erg onwaarschijnlijk dat de toepassing van klimaatengineering de klimaatverandering kan tegengaan als er niet tegelijkertijd een gedragsverandering plaatsvindt. Toch zou een sterke politieke inzet op de ontwikkeling van deze technologieën ertoe kunnen leiden dat men de noodzaak tot een verandering van levensstijl niet langer voelt. Voorwaarde voor een verantwoorde discussie over klimaatengineering is daarom dat het ontwikkelen of introduceren van klimaatengineering niet als alternatief voor gedragsverandering wordt opgevat. Voordat onderzoek naar klimaatengineering op grote schaal gaat plaatsvinden, zou er een beleid ontwikkeld moeten worden om moral hazard te voorkomen.

Natuur voor toekomstige generaties

We zijn het aan toekomstige generaties verplicht om op zijn minst de ecologische randvoorwaarden voor toekomstig leven in stand houden. Op zijn minst; het in stand houden van een aantrekkelijke leefomgeving zou een beter streven zijn. De onvoorspelbaarheid en ongecontroleerdheid van natuurverschijnselen is een kenmerkend aspect van de esthetische natuurervaring. Deze unieke bron van esthetische ervaringen mag toekomstige generaties niet ontzegd worden. Dit betekent dat we de natuur niet volledig aan technologische ingrepen zouden moeten willen onderwerpen. Ook zouden toekomstige generaties door onze keuzes met betrekking tot klimaatengineering niet serieus ingeperkt moeten worden in hun eigen keuzes met betrekking tot ecologisch beleid.

Intra- en intergenerationale rechtvaardigheid

Een verantwoord beleid moet garanderen dat klimaatengineering de onrechtvaardigheid tussen arme en rijke landen en tussen generaties niet groter maakt. Het gevaar bestaat dat bij de inzet van klimaatengineering juist de landen die relatief weinig hebben bijgedragen aan de opwarming van de aarde de kosten van de gevolgen moeten dragen. Bovendien zouden deze technologieën met name in conflictregio's en economisch zwakke landen misbruikt kunnen worden. Het beleid zou een antwoord moeten formuleren hoe dit misbruik kan worden voorkomen.

Ten slotte zou gewaarborgd moeten zijn dat de risico's en onzekerheden die gepaard gaan met klimaatengineering niet worden doorgeschoven naar de komende generaties. De technologie is ontwikkeld om de problemen van de huidige generaties op te lossen. Het zou niet rechtvaardig zijn om de negatieve gevolgen ervan simpelweg af te schuiven op toekomstige generaties.

5 Bestaande regulering van klimaatengineering

Jonathan Verschuuren, Floor Fleurke, Monique Riphagen

5.1 Inleiding

Ondanks het feit dat er veel wetenschappelijk onderzoek wordt gedaan naar de verschillende vormen van klimaatengineering, is er nog veel onbekend over de gevolgen van klimaatengineering bij grootschalige implementatie. Uit de voorgaande hoofdstukken is in ieder geval duidelijk geworden dat er ook negatieve bijwerkingen kunnen optreden, en dat die effecten grensoverschrijdend kunnen zijn. Solar Radiation Management (SRM) zou bijvoorbeeld kunnen leiden tot droogte in een naburig land, met alle negatieve gevolgen van dien. Omdat de voor- en nadelen van sommige vormen van klimaatengineering waarschijnlijk niet evenredig verdeeld zullen zijn en de implementatie grensoverschrijdende effecten kan hebben, is enige vorm van internationale afstemming en regulering gewenst.

Internationaal publiekrecht

Grensoverschrijdende milieuvervuiling of aantasting van het leefklimaat van andere staten wordt gereguleerd via het internationaal publiekrecht. In de zeventiende en achttiende eeuw, de periode waarin het internationaal publiekrecht ontstond, ging het met name om de afbakening en bescherming van de soevereiniteit van staten. Daarbij werd het gebruik gereguleerd van gebieden die buiten de nationale soevereiniteit vielen, zoals oceaangebieden. Toen de onderlinge afhankelijkheid en de noodzaak tot samenwerking tussen staten groter werd, breidde het internationaal recht zich sterk uit. Tegenwoordig bevat het inspannings- en resultaatverplichtingen op allerlei grensoverschrijdende gebieden, waaronder milieu (Kooijmans 2002). Het internationaal milieurecht kwam op in het begin van de twintigste eeuw en richtte zich in eerste instantie op de grensoverschrijdende effecten van milieuvervuiling en -degradatie.

Twee VN-conferenties waren belangrijk voor een meer geïntegreerde vorm van milieubescherming. In 1972 vond de VN-Conferentie over het menselijk leefmilieu plaats in Stockholm (UN Conference on the Human Environment). Op deze conferentie werd de noodzaak tot een internationale integrale benadering van de milieuproblematiek erkend. Verschillende principes uit de afsluitende verklaring werden opgenomen in bindende verdragen. De tweede belangrijke VN-Conferentie over milieu en ontwikkeling vond in 1992 plaats in Rio de Janeiro (UN Conference on Environment and Development, UNCED).

Tijdens deze conferentie werd het verband tussen duurzaamheid en ontwikkeling benadrukt, zoals in 1987 was beschreven in het Brundtland Rapport. Dit kwam tot uiting in de Verklaring van Rio (Glasbergen & Blowers 1995).

Het internationaal (publiek)recht wordt gevormd door de staten zelf. Ze leggen afspraken vast in verdragen en normen die rechtstreeks bindend zijn, en daarnaast in aanbevelingen, richtlijnen en beginselen die niet bindend zijn: de zogeheten *soft law* (Teasing et al. 2001). Het internationaal recht bestaat met name uit verdragen, waarbij twee of meerdere landen elkaars belangen erkennen en verplichtingen tegenover elkaar aangaan. Daarnaast bestaat het uit het internationaal gewoonterecht. Dit zijn ongeschreven regels die ieder erkent en naleeft en die geformaliseerd zijn, bijvoorbeeld het verbod op volkerenmoord of slavernij (Teasing et al. 2001). Over het algemeen worden de verdragen en het gewoonterecht vrij goed nageleefd.

Als staten een geschil hebben, zullen ze eerst proberen er gezamenlijk uit te komen, al dan niet via bemiddeling door een derde partij. Het Internationaal Gerechtshof in Den Haag is het enige internationale orgaan dat bevoegd is te oordelen over internationale milieugeschillen. Dit geldt overigens alleen voor de staten die het Hof erkennen (Glasbergen & Blowers 1995). In paragraaf 5.2 wordt verder ingegaan op het internationaal recht in relatie tot klimaatengineering, en op de handhaving van het internationaal recht.

Klimaatengineering

Onder de noemer klimaatengineering valt een scala aan nieuwe technologieën die nog in een vroeg stadium van ontwikkeling zijn. Toepassing is vooralsnog niet aan de orde, en er is dan ook nog geen specifiek regulerend kader voor klimaatengineering. Gezien de diversiteit aan technologieën én ecosystemen is het nog maar de vraag of één verdrag of regeling dit brede scala zou kunnen reguleren.

Het gebrek aan een overkoepelende regelgeving wil echter niet zeggen dat bestaande internationale juridische regels niet van toepassing zijn. In dit hoofdstuk onderzoeken we binnen welke bestaande internationale (milieu) verdragen de verschillende vormen van klimaatengineering momenteel gereguleerd zijn. Hierbij wordt gekeken naar de regulering van enkele specifieke vormen, namelijk:

- Cloud whitening: het witter maken van wolken door boven zee kleine zeezoutdeeltjes in de lucht te brengen, waardoor wolken het zonlicht beter reflecteren.
- Stratospheric Aerosol Injection (SAI): de emissie van zwaveldeeltjes in de stratosfeer, die vervolgens zonlicht reflecteren en verstrooien, net zoals bij een vulkaanuitbarsting.

- Het plaatsen van spiegels in de ruimte, om zonlicht terug de ruimte in te kaatsen.
- IJzerfertilisatie: het bemesten van de oceanen met ijzer om algengroei te bevorderen. Deze algen kunnen vervolgens extra CO₂ opnemen.
- Enhanced weathering: het versneld doen verweren van mineralen als olivijn op land of in zee om CO₂ vast te leggen.

Deze technologieën zijn uitgebreider omschreven in hoofdstuk 1. Ze kunnen in potentie tot effectieve instrumenten ontwikkeld worden (met uitzondering van de 'ruimtespiegels' misschien). Daarnaast hebben ze een grensoverschrijdend karakter, waardoor ze om regulering vragen.

Naast deze vormen van klimaatengineering komen in de literatuur ook andere technieken voor, zoals het wit verven van daken en andere oppervlakten en het plaatsen van spiegels op land. Dit zijn allebei aan land gebonden vormen van SRM. Omdat deze technieken lokaal worden toegepast, hangt de juridische toelaatbaarheid af van de regels die voor de betreffende locatie gelden. Het gaat bijvoorbeeld om de regels in een bestemmingsplan, of in natuurbeschermingswetgeving. Omdat dit bekende toetsingskaders zijn, en de effecten van deze vormen van klimaatengineering bovendien overzichtelijk zijn, blijven deze vormen van klimaatengineering in dit hoofdstuk buiten beschouwing. Dit geldt ook voor bepaalde vormen van Carbon Dioxide Removal (CDR), zoals het direct uit de lucht halen van CO₂ (DAC), het aanplanten en beheren van bossen en andere *sinks*, en aangepaste landbouwtechnieken waardoor minder CO₂ in de atmosfeer verdwijnt (biochar en BECCS). Hoewel dergelijke activiteiten ook vaak als vormen van klimaatengineering worden aangemerkt (Bracmort, Lattanzio & Barbour 2011), zoals ook in dit rapport, zijn ze in ieder geval in Europa al vergaand gereguleerd.¹⁰

In dit hoofdstuk onderzoeken we welke internationaalrechtelijke normen van toepassing zijn op klimaatengineering in het algemeen en op bovenstaande technologieën in het bijzonder. We gaan zowel in op het internationaal gewoonterecht en het verdragsrecht, als op de doorwerking van deze normen via Europese en/of Nederlandse wetgeving. Daarbij onderzoeken we welke mogelijkheden het gewoonterecht en het verdragsrecht bieden voor toepassing en welke randvoorwaarden en beperkingen ze stellen. Ten slotte bespreken we in de conclusie of het huidige stelsel aan regulering van klimaatengineering hiaten bevat.

10 Zie bijvoorbeeld Richtlijn 2009/31/EG betreffende de geologische opslag van kooldioxide, PbEG L 140/114.

5.2 Regulering van klimaatengineering

Het internationaal recht is met betrekking tot klimaatengineering in vier categorieën te verdelen: het internationaal gewoonterecht, mensenrechtenverdragen, specifieke aandacht voor klimaatengineering in milieuverdragen en algemene (milieu)verdragen. In deze paragraaf gaan we eerst in op de vraag tot wie het internationaal recht zich richt en hoe het gehandhaafd wordt. Daarna worden de verschillende vormen van internationaal recht met betrekking tot klimaatengineering elk afzonderlijk besproken.

5.2.1 Partijen

Tot wie richt het internationaal recht zich? Zowel bij SRM als CDR kan het in praktijk om vrij beperkte ingrepen gaan, die in principe toegepast kunnen worden door een kleine groep landen, een enkel land of door een of meer private partijen. Een voorbeeld van een technologie die door een enkel land kan worden toegepast is Stratospheric Aerosol Injection (SAI). Het is maar de vraag of de desbetreffende staat of private partij gebonden is aan de hierboven besproken normen.

Om te beginnen gelden verdragen in principe tussen de staten die partij zijn bij het betreffende verdrag. Als een land een verdrag niet heeft ondertekend of bekrachtigd (geratificeerd) hoeft het zich ook niet te houden aan de verplichtingen die uit het verdrag voortvloeien. Een relevant verdrag als het Verdrag inzake milieuveranderingstechnieken¹¹ (ENMOD-verdrag) is weliswaar door 76 staten geratificeerd, waaronder Nederland, China, de VS en Rusland, maar bijvoorbeeld niet door potentieel belangrijke spelers als Israël en Indonesië. Het internationaal gewoonterecht is in dit kader extra interessant, omdat dit wel voor alle landen geldt.

Private partijen zijn niet gebonden aan het internationaal recht. Of en in hoeverre burgers zijn gebonden aan verdragen waarbij 'hun' staat partij is, hangt af van de manier waarop de doorwerking van het internationaal recht is geregeld in het nationaal recht van de betreffende staat. Meestal is nadere regelgeving nodig om een verdrag in de nationale rechtsorde vast te leggen (te effectueren). Dit is vaak zelfs zo in landen waar verdragen automatisch doorwerken. Zoals in Nederland, waar het 'monistische stelsel' in artikel 93 van de Grondwet verankerd ligt.

Vrijwel altijd zijn de bepalingen tot de staat gericht. Het is vervolgens aan de staat om wetgeving tot stand te brengen, waardoor ook de burgers zich aan de regels uit het verdrag moeten houden. Vandaar dat bijvoorbeeld in de Wet ruimtevaartactiviteiten een vergunningplicht in het leven is geroepen voor

11 Voluit: het Verdrag inzake het verbod van militair of enig ander vijandelijk gebruik van milieuveranderingstechnieken van 18 mei 1977, Trb. 1977, 141 (inwerkingtreding: Trb. 1983, 68).

eenieder die ruimteactiviteiten wil verrichten. Volgens het Ruimteverdrag is de Nederlandse staat verantwoordelijk voor private partijen en zo'n vergunningplicht is dan een geschikte manier om invloed uit te oefenen op het doen en laten van individuen of organisaties.

Een rechtstreekse doorwerking van internationale verdragen op private organisaties wordt de laatste jaren wel veelvuldig bepleit. Het zou kunnen voorkomen dat mensenrechten geschonden worden, bijvoorbeeld door multinationals, of door private beveiligingsorganisaties die door staten worden ingezet in oorlogsgebied.

5.2.2 Handhaving en sancties

Handhaving van internationaal recht is problematisch. In de afwezigheid van een verplichte rechtsmacht bestaat er in veel gevallen geen rechter die de handhaving van internationaal recht af kan dwingen (of het nu om verdragen of om gewoonterecht gaat). Als een staat die partij is bij een verdrag de bepalingen uit dit verdrag schendt, is het aan de overige staten die partij zijn om zelf eenzijdige maatregelen te nemen als reactie op de schendingen. Een voorbeeld van zo'n eenzijdige maatregel is het verbreken van de diplomatieke betrekkingen. Eenzijdige maatregelen zijn in beginsel toegestaan. Een staat kan in reactie op een verdragsschending echter ook een tegenmaatregel nemen. Dat is in beginsel verboden, maar onder bepaalde voorwaarden toch toegestaan. De voorwaarden zijn vastgelegd in de ILC-artikelen inzake staatsaansprakelijkheid.

Het ene verdrag komt eenvoudiger tot stand en is gemakkelijker na te leven en te handhaven dan het andere verdrag. Het Verdrag van Wenen betreffende de uitfasering van de ozonaantastende stoffen cfk, hcfk en methylobromide is door een groot aantal landen geratificeerd en wordt goed nageleefd. De vervanging van deze stoffen door alternatieven is relatief eenvoudig gebleken en heeft geen gevolgen voor de leefstijl van burgers.

Dit ligt anders voor het VN-Raamverdrag klimaatverandering, het UNFCCC. De uitwerking van dit verdrag verloopt heel moeizaam en het Kyoto-protocol is door slechts een beperkt aantal landen geratificeerd. Dit is ook niet zo verwonderlijk, gezien de economische effecten van een lagere CO₂-uitstoot, oftewel van een lager verbruik van fossiele energie. De mogelijkheid die het internationaal recht biedt om grensoverschrijdende problemen te agenderen en te reguleren, is dus ook sterk afhankelijk van het soort probleem en de politieke context waarbinnen de regulering moet plaatsvinden.

5.3 Internationaal gewoonterecht

Ook los van specifieke verdragen legt het internationaal recht staten beperkingen op. Dat gebeurt met name door internationaalrechtelijke beginselen.

Deze internationaalrechtelijke beginselen worden gezien als gewoonterecht, dat wil zeggen als bindende normen die voor alle staten gelden. Enkele van deze internationaalrechtelijke beginselen hebben specifiek betrekking op het milieu. Van belang voor klimaatengineering zijn met name het *no harm*-beginsel, het voorzorgbeginsel en het beginsel van intergenerationele billijkheid (*inter-generational equity*).

5.3.1 Het 'no harm'-beginsel

Het *no harm*-beginsel houdt in dat staten geen ernstige schade mogen aanrichten aan het milieu van andere staten of aan gebieden die buiten hun nationale jurisdictie vallen, zoals delen van het poolgebied, de oceanen of de ruimte.

Dit beginsel heeft zich met name ontwikkeld door de jurisprudentie van het Internationaal Gerechtshof en is inmiddels vastgelegd in verschillende verdragen. Het *no harm*-beginsel is vooral van toepassing op die vormen van klimaatengineering waarbij een individuele staat schade kan toebrengen aan een of meer andere staten. Dit geldt vooral voor de SRM-technologieën cloud whitening, SAI en het plaatsen van spiegels in de ruimte. Nu ligt het niet in de lijn der verwachting dat individuele staten de middelen hebben om zelfstandig spiegels in de ruimte te plaatsen, dus blijven de eerste twee vormen over.¹²

Staten moeten met gepaste zorgvuldigheid (*due diligence*) handelen om het risico op grensoverschrijdende milieuschade te minimaliseren.¹³ Of zoals het Internationaal Gerechtshof in 1997 stelde: 'In the field of environmental protection, vigilance and prevention are required on account of the often irreversible character of damage to the environment and of the limitations inherent in the very mechanism of reparation of this type of damage.'¹⁴ Dit houdt in dat de staat die het initiatief neemt, de staat die de eventuele nadelige gevolgen ondervindt moet raadplegen.¹⁵ In 2010 bepaalde het Internationaal Gerechtshof bovendien dat er vooraf een milieueffectrapportage moet worden uitgevoerd als er een risico bestaat op het veroorzaken van grensoverschrijdende milieuschade. Hierbij moet ook de betrokken bevolking gehoord worden. Gedurende de uitvoering moet gecontroleerd worden op eventuele milieuschade.¹⁶

Nu zou je kunnen redeneren dat activiteiten die de uitstoot van CO₂ bevorderen, zoals de exploitatie van een kolencentrale, ook een schending van het *no harm*-principe zijn. De klimaatverandering die daardoor ontstaat, kan immers evenzeer schade berokkenen aan andere staten. Denk aan over-

¹² Ibid., artikel 2(a).

¹³ Ibid.

¹⁴ In de *Gabčíkovo-Nagymaros*-zaak tussen Hongarije en Slowakije, ICJ Reports (1997) 78, par. 140.

¹⁵ Ibid., artikel 9.

¹⁶ *Pulp-Mills*-zaak tussen Argentinië en Uruguay, ICJ Reports (2010) 60, par. 204-205.

stromingen die te wijten zijn aan een stijging van de zeespiegel, met alle (ook economische) schade van dien. Elke staat heeft echter het recht om zijn natuurlijke hulpbronnen op eigen grondgebied te exploiteren. Dit recht kent weliswaar zijn beperkingen: er mag geen significante grensoverschrijdende milieuschade optreden (beginsel 21 van de Verklaring van Stockholm uit 1972). Dit moet echter eerder worden opgevat als een zorgplicht dan als een absoluut beginsel. Het is namelijk erg lastig om een oorzaak-gevolgrelatie aan te tonen tussen de handeling en het effect op het klimaat. Het klimaat kent een natuurlijke variabiliteit, waardoor een individuele gebeurtenis in de praktijk niet kan worden toegeschreven aan de opwarming van de aarde (Okkerse 2012). Daarnaast stoot iedereen CO₂ uit – en is dus iedereen medeveroorzaker van klimaatverandering. Door deze multicausaliteit is het moeilijk een of meer veroorzakers aan te spreken, omdat iedere veroorzaker op zich een insignificant effect heeft op de opwarming van de aarde. Een land dat een ander land aansprakelijk stelt voor milieuschade, lijkt dus weinig kans van slagen te hebben (Robesin 2012).

Net zo min zal het gemakkelijk zijn om staten aansprakelijk te stellen voor de schade die eventueel voortvloeit uit de toepassing van klimaatengineering. Om deze aansprakelijkheid vast te stellen, moet ook hier een causaal verband kunnen worden aangetoond tussen de activiteiten van het ene land en het effect hiervan op het milieu van een ander land. De schade moet bovendien weer significant zijn. Het aantonen van dit verband en de bijbehorende schade zal heel lastig zijn. Neem een orkaan: is die ontstaan als gevolg van klimaatverandering, als gevolg van klimaatengineering, of is het gewoon een natuurlijk verschijnsel?

Hoewel staten volgens het no harm-beginsel niet zonder gepaste terughoudendheid en nader onderzoek aan de slag kunnen gaan met klimaatengineering, verbiedt dit principe de toepassing van klimaatengineering niet. Staten zullen in praktijk niet vanuit dit principe op hun activiteiten kunnen worden aangesproken, tenzij een causaal verband kan worden aangetoond.

5.3.2 Het voorzorgbeginsel

Het voorzorgbeginsel houdt het volgende in: als er een dreiging van ernstige of onomkeerbare aantasting van het milieu bestaat, mag de afwezigheid van wetenschappelijke zekerheid geen reden zijn om kosteneffectieve maatregelen ter bescherming van het milieu achterwege te laten.¹⁷ Hoewel het Internationaal Gerechtshof niet expliciet heeft erkend dat dit beginsel een internationaal gewoonterechtelijk beginsel is, wordt er in de literatuur doorgaans van uitge-

17 Dit is de definitie zoals die voorkomt in de VN-Verklaring inzake milieu en ontwikkeling, kortweg de Verklaring van Rio, uit 1992 (beginsel 15). Andere juridische documenten gebruiken vaak andere definities van het beginsel, die vaak minder ruimte laten.

gaan dat het deze status inmiddels bijna heeft (Birnie, Boyle & Redgwell 2009, p.160).

Binnen de EU is voorzorg een belangrijk beginsel. Het is expliciet opgenomen in zowel het EU-milieurecht (te weten in het EU-Werkingsverdrag¹⁸ en in specifieke milieurichtlijnen), als in het nationaal recht van veel lidstaten.¹⁹ Het Europese Hof van Justitie heeft het beginsel de status van 'algemeen beginsel van Europees recht' gegeven. Dit impliceert dat het beginsel bij de interpretatie van Europese verplichtingen een rol van betekenis speelt. Het beginsel wordt meestal in praktijk gebracht door een milieueffectbeoordeling, of door een andere vorm van beoordeling vooraf. Als er een gebrek aan kennis wordt vastgesteld, of als er onzekerheden bestaan over de mogelijk nadelige milieueffecten, moet aanvullend onderzoek deze kennishiaten opvullen (of in elk geval kleiner maken). Uiteindelijk moet rekening worden gehouden met eventuele onzekerheden, wat in het uiterste geval tot een moratorium op een bepaalde activiteit kan leiden (Trouwborst 2006; Fleurke 2013).

Over SRM-technologieën bestaan nog tal van wetenschappelijke onzekerheden. Gezien het bovenstaande moet volgens het voorzorgprincipe terughoudend worden omgesprongen met de inzet ervan. Klimaatengineering kan echter niet beoordeeld worden ten opzichte van een *stand still*-situatie, zoals bij veel andere nieuwe vormen van technologie het geval is, denk bijvoorbeeld aan de implementatie van synthetische biologie. En omdat ook de gevolgen van klimaatverandering door CO₂-uitstoot onzeker zijn, zou je vanuit het voorzorgprincipe ook kunnen redeneren dat een (voorzichtige) implementatie van klimaatengineering verstandig is om verdere opwarming van de aarde te voorkomen. Het zou in elk geval pleiten voor onderzoek naar de mogelijkheden van klimaatengineering.

Zo bezien lijkt het toepassen van het voorzorgbeginsel vooral neer te komen op een afweging van risico's. De waarde van het voorzorgprincipe in dit proces zit dan ook vooral in het procedurele karakter ervan. Het voorzorgbeginsel vereist dat onzekerheden in kaart worden gebracht, dat alternatieven worden onderzocht, dat er constant naar nieuwe informatie wordt gezocht door middel van monitoring, en dat het publiek wordt betrokken bij de besluitvorming. Daarnaast is het stap-voor-stap-model een belangrijk element van voorzorg. Dat wil zeggen dat de risico's en onzekerheden bij elke nieuwe stap opnieuw beoordeeld en afgewogen moeten worden. Of het nu om onderzoek gaat, om veldexperimenten of om toepassing op grotere schaal.

18 Artikel 191(2).

19 Onder andere van Frankrijk, Duitsland en Groot-Brittannië.

5.3.3 Het beginsel van intergenerationele billijkheid

Het derde beginsel van gewoonterecht is het beginsel van billijkheid tussen generaties. De huidige generatie mag toekomstige generaties niet met een zodanige milieulast opzadelen, dat zij in een slechtere positie van start moeten gaan dan de huidige generatie. Dit beginsel is nog geen gewoonterecht, en dus niet algemeen bindend. Het komt vooral voor in soft law-documenten zoals de Verklaring van Rio,²⁰ maar ook in het VN-Raamverdrag. In de context van dit verdrag is het beginsel wel juridisch bindend.²¹

Ook het beginsel van intergenerationele rechtvaardigheid is relevant voor klimaatengineering, zij het net als bij het voorzorgprincipe, op een niet-eenduidige wijze. De intentie van klimaatengineering is het voorkomen van nadelige effecten die veroorzaakt worden door de uitstoot van broeikasgassen. Zo bezien zou het beginsel de huidige generatie kunnen dwingen om klimaatengineering toe te passen. Wellicht ontstaat juist zónder toepassing van klimaatengineering ernstige en onomkeerbare schade aan het milieu.²²

5.3.4 Conclusie

Het is niet zo dat het internationaal gewoonterecht de ontwikkeling en toepassing van klimaatengineering als zodanig verbiedt of ernstig beperkt. Wel stellen deze beginselen randvoorwaarden aan de ontwikkeling en toepassing van klimaatengineering. Klimaatengineering:

- Mag niet leiden tot ernstige of onomkeerbare negatieve effecten op het milieu van andere staten of op gebieden die niet onder de jurisdictie van een staat vallen, zoals oceanen of (delen van) de poolgebieden (no harm-beginsel).
- Mag alleen worden geïmplementeerd nadat een milieueffectrapportage is uitgevoerd waarin vooraf onderzocht wordt wat de effecten precies zijn, en waarbij betrokkenheid van de bevolking is gegarandeerd (no harm-beginsel).
- Mag alleen worden toegepast nadat onzekerheden over eventuele nadelige neveneffecten op het milieu zijn onderzocht en geminimaliseerd, of nadat expliciet rekening is gehouden met de potentiële, maar niet bewezen, nadelige neveneffecten (voorzorgbeginsel).
- Mag alleen worden toegepast onder voortdurende bewaking van effecten ervan op het milieu (voorzorgbeginsel).
- Mag toekomstige generaties niet beperken in hun ontwikkelingsmogelijkheden (het beginsel van intergenerationele billijkheid).

20 Beginsel 3 uit de Verklaring van Rio (1992) luidt: 'The right to development must be fulfilled so as to equitably meet developmental and environmental needs of present and future generations.'

21 Artikel 3(1).

22 Bodansky over de toepassing van het no harm-beginsel op geo-engineering: 'It is unclear in which way the principle cuts' (Bodansky 2011, p.15).

Bij de toepassing van het internationaal gewoonterecht komt echter een aantal knelpunten naar voren. Een fundamenteel probleem is dat nader onderzoek naar de gevolgen van klimaatengineering gewenst is voordat er gesproken kan worden over toepassing. Een groot deel van het onderzoek kan plaatsvinden door middel van computermodellering en kleinschalige experimenten, al dan niet in het laboratorium. Uiteindelijk zal er echter toch grootschaliger moeten worden getest, waarbij de vraag rijst of het verschil tussen 'grootschalig onderzoek' en 'toepassing' nog relevant is. Wat de principes van voorzorg en inter-generationale rechtvaardigheid betreft: deze kunnen zowel voor als tegen klimaatengineering worden ingezet. Klimaatengineering brengt risico's met zich mee, maar kan tegelijkertijd de effecten van klimaatverandering beperken of voorkomen. Hiermee laten de beginselen volgens ons wel ruimte voor onderzoek naar klimaatengineering.

5.4 Mensenrechtenverdragen

In de literatuur wordt weinig tot geen aandacht besteed aan mensenrechtenverdragen in relatie tot klimaatengineering. Dat komt omdat ook mensenrechten zowel voor als tegen klimaatengineering in stelling kunnen worden gebracht. Klimaatverandering kan ertoe leiden dat een gebied te nat of juist te droog wordt. Wie zijn woning onder water ziet verdwijnen, of geen drinkwater meer heeft, wordt aangetast in zijn mensenrechten. Klimaatengineering kan dan een noodzakelijke maatregel zijn om tegemoet te komen aan elementaire mensenrechten.

Tegenstanders betogen precies het tegengestelde. Volgens de ETC Group (ETC Group 2011) kan klimaatengineering leiden tot ernstige negatieve gevolgen voor mens en milieu, zoals schoksgewijze temperatuurwijzigingen, veranderde neerslagpatronen en regionale droogte. Deze gevolgen zouden kunnen leiden tot een schending van mensenrechten, met name van het recht op een beschermd milieu (Pittman, Henry & Hariono 2011).²³ Het recht op een beschermd of leefbaar/schoon milieu is echter geen erkend afdwingbaar mensenrecht. Wel wordt ernstige milieuvervuiling vaak als een aantasting van andere mensenrechten gezien, zoals het recht op een ongestoord gezinsleven (artikel 8 van het Europees Verdrag voor de Rechten van de Mens), en soms is milieubescherming als opdracht aan de staat vastgelegd (bijvoorbeeld in artikel 12 van het Internationaal Verdrag inzake economische, sociale en culturele rechten).

In het Verdrag van Aarhus (voluit het Verdrag betreffende toegang tot informatie, inspraak bij besluitvorming en toegang tot de rechter inzake milieuaangelegenheden), geldt het recht op een leefbaar milieu als uitgangspunt

23 Het betreft hier een rapport van de Canadese ngo Mass Action Demand voor het 4th International Conference on Human Rights and Human Development, Bangkok 2011.

voor de erkenning van de procedurele rechten uit de titel (artikel 1).²⁴ Het Verdrag van Aarhus is in 2001 in werking getreden en is door 46 Europese staten geratificeerd. In het algemeen wordt er dan ook van uitgegaan dat deze procedurele rechten van toepassing zijn op belangrijke beslissingen over milieuaangelegenheden, ook als er geen grensoverschrijding plaatsvindt.

5.4.1 Conclusie

De mensenrechtenverdragen stellen volgens ons een aantal voorwaarden waaraan de toepassing van klimaatengineering moet voldoen.

- De besluitvorming moet openbaar zijn.
- Belanghebbenden en milieuorganisaties moeten betrokken worden bij deze besluitvorming.
- Toegang tot de rechter moet mogelijk zijn. In Nederland is dit voorzien via de Algemene wet bestuursrecht, die van toepassing is op besluitvorming door de overheid.

5.5 Specifieke aandacht voor klimaatengineering in milieuverdragen

Hoewel klimaatengineering als onderwerp nog te jong is voor specifieke verdragen, bestaan er al een paar milieuverdragen die er direct op van toepassing zijn. Hierin zijn met name procedurele eisen vastgelegd. In deze paragraaf worden achtereenvolgens besproken: het Verdrag inzake milieuveranderings-technieken (ENMOD-verdrag), het VN-Raamverdrag inzake klimaatverandering (UNFCCC), het Biodiversiteitsverdrag (CBD) en het Verdrag van Londen (inzake de voorkoming van de verontreiniging van de zee ten gevolge van het storten van afval en andere stoffen).

5.5.1 ENMOD-verdrag

Tijdens de Koude Oorlog hebben zowel de Verenigde Staten als de Sovjet-Unie wapens voor massadestructie ontwikkeld. Amerikaanse wetenschappers deden onder andere onderzoek naar weerm modificatie als middel tot oorlogsvoering. Dit wapen kon bijvoorbeeld worden ingezet om oogsten te vernietigen.

Tijdens de Vietnamoorlog werd hier op grote schaal gebruik van gemaakt. Zo was Operatie Popeye bedoeld om het transport van militaire goederen over de Ho Chi Minh-weg te ontregelen door middel van *cloud seeding*. De operatie slaagde erin zware regen te creëren, maar ontregelde het transport van militaire middelen allerm minst. Wel droeg de operatie (ingezet tussen 1967 en 1972) bij aan ernstige overstromingen in 1977, waardoor de oogst in Noord-

²⁴ Verdrag van 25 juni 1998, Trb. 2001, 73.

Vietnam in dat jaar minimaal was. Het uitlekken van Operatie Popeye leidde uiteindelijk tot het Verdrag inzake milieuveranderingstechnieken (ENMOD-verdrag),²⁵ dat in 1977 in Genève werd ondertekend.

Het verdrag is in 1983 door Nederland geratificeerd en richt zich specifiek op *enigerlei techniek voor het veranderen - door middel van opzettelijke manipulatie van natuurlijke processen - van de dynamica, de samenstelling of de structuur van de aarde, waaronder begrepen de flora en fauna, de lithosfeer, de hydrosfeer en de atmosfeer, dan wel van de kosmische ruimte* (artikel II).

Alle hier besproken vormen van klimaatengineering vallen onder deze definitie.²⁶ Volgens sommige auteurs is het verdrag niet relevant voor klimaatengineering. Het verdrag zou alleen de toepassing van milieuveranderingstechnieken voor militaire of vijandelijke doeleinden verbieden (artikel I).²⁷ Dit laatste is zonder meer juist. De preambule laat zich zelfs ronduit positief uit over vreedzaam gebruik van milieuveranderingstechnieken: *In het besef dat het gebruik van milieuveranderingstechnieken voor vreedzame doeleinden de onderlinge relatie tussen de mens en de natuur zou kunnen verbeteren en zou kunnen bijdragen tot het behoud en de verbetering van het milieu ten bate van de huidige en toekomstige generaties.*

Volgens ons is het verdrag wel degelijk relevant. Het bepaalt namelijk in artikel III:

1. *De bepalingen van dit Verdrag vormen geen belemmering voor het gebruik van milieuveranderingstechnieken voor vreedzame doeleinden en doen geen afbreuk aan algemeen erkende beginselen en geldende regels van internationaal recht betreffende een zodanig gebruik.*
2. *De Staten die partij zijn bij dit Verdrag verbinden zich tot het vergemakkelijken van, en hebben het recht deel te nemen aan, een zo uitgebreid mogelijke uitwisseling van wetenschappelijke en technologische gegevens betreffende het gebruik van milieuveranderingstechnieken voor vreedzame doeleinden. Staten die partij zijn en die hiertoe in staat zijn, dragen alleen, of tezamen met andere Staten of internationale organisaties, bij aan internationale economische en wetenschappelijke samenwerking ter zake van het behoud, de verbetering en het vreedzaam gebruik van het milieu, daarbij naar behoren rekening houdend met de behoeften van de ontwikkelingsgebieden in de wereld.*

25 Voluit: het Verdrag inzake het verbod van militair of enig ander vijandelijk gebruik van milieuveranderingstechnieken van 18 mei 1977, Trb. 1977, 141 (inwerkingtreding: Trb. 1983, 68). Het verdrag wordt vaak aangeduid als het ENMOD-verdrag, wat staat voor Environmental Modification.

26 Zie bijvoorbeeld Zedalis 2010.

27 Zie bijvoorbeeld Bodansky 2011, p. 15.

Het tweede lid stelt dus wel degelijk bindende juridische randvoorwaarden aan de toepassing van klimaatengineering:

- Staten mogen niet hun eigen gang gaan. Er moet kennisuitwisseling plaatsvinden over de milieuveranderingstechnieken die onder de hierboven geciteerde definitie vallen.
- Staten moeten bijdragen aan internationale economische en wetenschappelijke samenwerking op het gebied van behoud en verbetering van het milieu.
- Staten moeten rekeninghouden met de behoeften van ontwikkelingslanden. Dit is een soft law-beginsel en als zodanig geen hard juridisch beginsel. In veel politieke overeenkomsten is het echter een belangrijk uitgangspunt. Denk hierbij bijvoorbeeld aan het VN-Raamverdrag inzake klimaatverandering (UNFCCC) en aan de klimaatonderhandelingen die daaruit volgen.

Uit de eerste en derde randvoorwaarde kan een recht van ontwikkelingslanden op technologie worden afgeleid. Het is daarmee een pleidooi voor een *technology transfer* van westerse landen naar ontwikkelingslanden.

Het ENMOD-verdrag laat ruimte voor zowel onderzoek naar als toepassing van klimaatengineering. Wel worden er procedurele voorwaarden gesteld, waarbij kennisuitwisseling, economische en wetenschappelijke samenwerking centraal staan. Klimaatengineering voor militaire doeleinden, de zogenoemde *dual use*, wordt binnen deze voorwaarden niet toegestaan. Het is echter wel zo dat het verdrag alleen van toepassing is op de 76 staten die het hebben geratificeerd.

5.5.2 VN-Raamverdrag inzake klimaatverandering (UNFCCC)

Het meest voor de hand liggende verdrag ter regulering van klimaatengineering is het VN-Raamverdrag inzake klimaatverandering (UNFCCC).²⁸ Dit verdrag is immers tot stand gekomen om (gevaarlijke) klimaatverandering te voorkomen. Bijna alle landen, in totaal 194, hebben het Raamverdrag geratificeerd. Volgens het verdrag is het klimaat een wereldwijd goed waarvan de stabiliteit aangetaast kan worden door de uitstoot van CO₂ en andere broeikasgassen. De doelstelling is de emissie van deze gassen te beperken tot een niveau waarop zich geen gevaarlijke onomkeerbare gevolgen voordoen.

Het verdrag bevat geen expliciete verwijzing naar klimaatengineering. Klimaatengineering kan binnen de context van het verdrag wel gezien worden als een cluster van technologieën die klimaatverandering kunnen voorkomen of beperken. Daarmee zijn de algemene beginselen uit het verdrag van toepassing op besluitvorming over klimaatengineering door de 194 landen (het gaat

28 Trb. 1992, 189.

vooral om het no harm-beginsel en het voorzorgsbeginsel). Uiteraard krijgt klimaatengineering veel aandacht in de kantlijn van het VN-Raamverdrag, maar dit heeft nog niet geleid tot het aannemen van resoluties of andere besluiten.

Het volgende rapport van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Assessment Report 5 (AR5), zal ingaan op de verschillende vormen van klimaatengineering. Dit rapport komt uit in 2014. De rapporten van het IPCC hebben doorgaans een grote invloed op de onderhandelingen in het kader van het VN-Raamverdrag. Daarom valt te verwachten dat klimaatengineering na het uitkomen van AR5 (hoger) op de agenda zal komen te staan van de klimaatonderhandelaars.

5.5.3 Biodiversiteitsverdrag (CBD)

Het Biodiversiteitsverdrag (CBD) is een breed milieuverdrag dat werd aangenomen op de VN-Conferentie over milieu en ontwikkeling in 1992.²⁹ Het verdrag staat in het teken van duurzame ontwikkeling en gaat verder dan alleen het beschermen van de biodiversiteit. Ook dit verdrag heeft inmiddels zo goed als universeel lidmaatschap, al zijn de Verenigde Staten geen partij. In het kader van dit verdrag is in 2010 een resolutie aangenomen waarin staten worden 'opgeroepen' om geen klimaatengineering toe te passen die de biodiversiteit kan schaden. Alleen wetenschappelijke experimenten op kleine schaal worden toegelaten, als tenminste vooraf onderzoek is gedaan naar de mogelijke milieueffecten en als ze plaatsvinden in een gecontroleerde setting.³⁰ Opvallend is de terughoudende woordkeuze in de resolutie ('invites Parties'), die het soft law-karakter ervan onderstreept. De besluiten die de Conference of Parties (COP) neemt zijn niet bindend. Bovendien strekt het mandaat van het verdrag zich slechts uit tot het behoud van biodiversiteit en het duurzame gebruik van biologische hulpbronnen. Twee jaar eerder had de COP al een vergelijkbare resolutie aangenomen over ijzerfertilisatie die meer

29 Trb. 1992, 164.

30 Decision X/33, COP 10, Nagoya 2010. De tekst van de resolutie luidt: '[Parties are invited to] Ensure (...) in the absence of science based, global, transparent and effective control and regulatory mechanisms for geo-engineering, and in accordance with the precautionary approach and Article 14 of the Convention, that no climate-related geo-engineering activities that may affect biodiversity take place, until there is an adequate scientific basis on which to justify such activities and appropriate consideration of the associated risks for the environment and biodiversity and associated social, economic and cultural impacts, with the exception of small scale scientific research studies that would be conducted in a controlled setting in accordance with Article 3 of the Convention, and only if they are justified by the need to gather specific scientific data and are subject to a thorough prior assessment of the potential impacts on the environment (...).'

gewicht in de schaal lijkt te leggen; hierin werd partijen 'verzocht' in overeenstemming met voorzorg te handelen.³¹

In oktober 2012 werd de resolutie uit 2010 bevestigd. Opnieuw werd aangedrongen op het in acht nemen van voorzorg. Tegelijkertijd werd erop gewezen dat voorzorg, internationaal gewoonterecht en milieueffectbeoordelingen weliswaar relevant zijn voor klimaatengineering, maar dat dit niet voldoende is voor de mondiale regulering van klimaatengineering:³² '(...) noted that the application of the precautionary approach, as well as customary international law, including States' general obligations with regard to activities within their jurisdiction or control and with regard to possible consequences of those activities, and environmental impact assessment requirements, may be relevant for geo-engineering activities *but would still form an incomplete basis for global regulation.*'

31 Decision IX/16, COP 9, Bonn 2008. De relevante tekst luidt: 'requests Parties and urges other Governments, in accordance with the precautionary approach, to ensure that ocean fertilization activities do not take place until there is an adequate scientific basis on which to justify such activities, including assessing associated risks, and a global, transparent and effective control and regulatory mechanism is in place for these activities; with the exception of small scale scientific research studies within coastal waters. Such studies should only be authorized if justified by the need to gather specific scientific data, and should also be subject to a thorough prior assessment of the potential impacts of the research studies on the marine environment, and be strictly controlled, and not be used for generating and selling carbon offsets or any other commercial purposes (...).'

32 CBD COP 11 (8-19 October 2012).

Canada gedooft 'wilde' oceaanbemesting

Gaston Dorren

Een grote hoeveelheid ijzersulfaat in zee storten om te onderzoeken of dat klimaatverandering tegengaat: mag dat? Nee, dat mag niet, of hoogstens onder strikte voorwaarden. Ene Russ George deed het toch – en lijkt ermee weg te komen.

In de zomer van 2012 voer een omgebouwde vissersboot dagenlang, misschien zelfs wekenlang, over een klein stukje van de noordoostelijke Grote Oceaan, net buiten de Canadese tweehonderdmijlszone. De opvarenden voerden een bijzondere taak uit: ze gooiden zo'n 120 ton ijzerertsstof in het water. Daarna keerden ze terug naar Canada. Verantwoordelijk voor deze ongewone actie waren twee organisaties. De ene is de Old Massett Village Council (OMVC), de dorpsraad van een inheemse vissersgemeenschap op de Canadese eilandengroep Haida Gwaii. Old Massett is economisch zwaar getroffen door de afname van de jaarlijkse zalmtrek in zijn rivieren. Door de zee te bemesten met sulfaat (uit het ijzerertsstof) hoopten de vissers een planktonbloei op te wekken die de zalmpopulatie zou herstellen. De raad van Old Massett heeft veel geld in het project gestoken: volgens sommige bronnen een miljoen dollar, volgens andere 2,5 miljoen. Daarnaast was ook de Haida Salmon Restoration Corporation (HSRC) betrokken bij het project, een bedrijf van de Amerikaanse zakenman Russ George, die al langer oceaanbemestingsprojecten wil uitvoeren. Een poging daartoe van zijn voormalige bedrijf Planktos stuitte enkele jaren geleden op verzet van diverse overheden, hetgeen George een slechte reputatie heeft bezorgd. Bij die gelegenheid was zijn doel niet om de visserij te herstellen, maar om te onderzoeken of hij planktonbloei kon opwekken om daarmee CO₂ uit de atmosfeer te halen – klimaatengineering dus. Het HSRC-project van 2012 beoogde mede, en waarschijnlijk vooral, wetenschappelijke kennis op te leveren over CO₂-vastlegging.

Op 15 oktober had de Britse krant *The Guardian* bovenstaand nieuws als primeur. De auteur was de Canadese freelancer Martin Lukacs, zijn bron de ngo ETC Group. Zowel Lukacs als ETC zijn uitgesproken activistisch van aard, en de publicatie lijkt dan ook 'politiek getimed' te zijn: in India naderde een conferentie van het Biodiversiteitsverdrag zijn beslissende fase. Vanwege de milieurisico's wilde een aantal landen, net als ETC, scherpere regels tegen experimenten met klimaatengineering. Door het project juist nu naar buiten te brengen, hoopte ETC ongetwij-

feld de kans op de gewenste afloop te vergroten. Tevergeefs: de conferentie bevestigde enkel een eerdere verklaring over klimaatengineering. Lukacs voegde aan zijn verslaggeving nogal wat eigen interpretatie toe. Zo schreef hij dat het nieuws 'waarschijnlijk tot woede zou leiden op de VN-milieutop in India deze week'. Ook beweerde hij, zonder bronvermelding, dat Russ George door het project 'lucratieve koolstofkredieten hoopte binnen te slepen'. Dat zou kunnen, maar die hoop zou dan in ieder geval ongegrond zijn: het experiment voldoet bij lange na niet aan de voorwaarden die aan koolstofkredieten zijn gesteld. Wel hebben critici beweerd dat George de OMVC zou hebben voorgespiegeld dat ze hun investeringen zouden terugverdienen met zulke kredieten. Maar zolang er voor die bewering geen bewijs wordt geleverd, is het eerder een verdachtmaking.

Wat heeft het experiment opgeleverd? In wetenschappelijk opzicht waarschijnlijk weinig, al hebben de onderzoekers zelf er nog niet over gepubliceerd. Wel heeft George luchtfoto's verspreid die een planktonbloei laten zien in de buurt van de plek waar het ijzersulfaat in zee is geworpen. Maar oceanografen, onder wie Kenneth Denman van de Universiteit van Victoria aan de Canadese westkust, hebben erop gewezen dat dit deel van de Grote Oceaan elke zomer planktonbloei vertoont. Het is mogelijk dat het toegevoegde ijzer de bloei heeft versterkt, maar dat is verre van zeker. Om zekerheid te verkrijgen had het experiment volgens Denman anders opgezet moeten worden. Er bestaat dus op zijn minst twijfel aan het wetenschappelijk gehalte van het experiment.

Het bericht in *The Guardian*, overgenomen door tal van andere voor-
aanstaande kranten, bracht inderdaad veel verontwaardiging teweeg. Namens de natuurbeschermingsorganisatie IUCN noemde zeerechtsdeskundige Kristina Gjerde het project 'in flagrante strijd' met de internationale regels. Toch riep ETC-medewerkster Silvia Ribeiro landen op om 'nu eindelijk dit soort experimenten ondubbelzinnig te verbieden'. Kennelijk zijn ze dus niet ondubbelzinnig verboden.

Of wel? De partijen van het Biodiversiteitsverdrag (zie 5.5.3) hebben zich meermalen tegen ijzerfertilisatie uitgesproken, echter uitsluitend in de vorm van niet-bindende 'oproepen'. Het Verdrag van Londen is wel bindend (zie 5.5.4), en verbiedt het dumpen van afval op zee. Maar valt de actie van HSRC daaronder? Nee, meent Edward Parson, hoogleraar milieurecht aan de Universiteit van Californië in Los Angeles. Volgens hem creëert een wetenschappelijk experiment, hoe knullig ook, automatisch een uitzondering, omdat het in zee gegooide materiaal dan geen afval is. Dat is een vreemde redenering. Ten eerste beperkt het

verdrag zich niet tot afval, maar gaat het over 'afval en ander materiaal'. Belangrijker is dat de verdragspartijen in 2010 een 'beoordelingsraamwerk voor wetenschappelijk onderzoek met betrekking tot oceaانبemesting' hebben opgesteld. Dit document, dat juridisch bindend is, benadrukt onder meer dat economische belangen de opzet van zulk onderzoek niet mogen beïnvloeden – een eis waar de HSRC-actie zeker niet aan voldoet. De verdragspartijen hebben dan ook inmiddels hun zorg uitgesproken over het experiment. In sancties voorziet het Verdrag van Londen niet; het is aan de partijen zelf om de verdragsbepalingen te handhaven.

De Canadese overheid heeft nu juist een schimmige rol gespeeld in deze kwestie. Volgens de milieudienst Environment Canada hebben medewerkers in mei 2012 zwart op wit aan HSRC laten weten dat hun plannen in strijd waren met het internationaal én nationaal recht. Maar vervolgens heeft Environment Canada niet geprobeerd om het uitvaren van het schip te beletten, noch heeft de milieudienst na afloop actie ondernomen. Weliswaar is het ijzersulfaat overboord gegooid in internationale wateren, maar als de betrokkenen de Canadese nationaliteit hebben (dat lijkt voor de meesten te gelden) of gebruikmaken van Canadese havens (hetgeen zeker het geval is), is Canada bevoegd om internationale verdragen te handhaven. Hierbij geldt in principe dat de overtreding moet zijn geconstateerd, bijvoorbeeld met behulp van satellietbeelden, maar nu de HSRC zelf ruchtbaarheid heeft gegeven aan zijn actie, is dat niet meer zo van belang.

HSRC-woordvoerders beweren echter dat diverse overheidsdiensten (belastingdienst, ruimtevaartorganisatie, ministerie van visserij) hen juist actief geholpen zouden hebben bij het voorbereiden van de plannen. Ze leveren hiervoor geen bewijzen aan, maar het is in ieder geval zeker dat minister van milieu Peter Kent pas een onderzoek aankondigde nadat de zaak in de publiciteit was gekomen. Geruime tijd na de gebeurtenissen zelf, dus. Dat onderzoek heeft vooralsnog geen openbare resultaten opgeleverd. Op de website van Environment Canada is over de kwestie geen letter te vinden.

Overigens vermoeden wetenschappers dat het experiment, hoewel het grootste in zijn soort tot nu toe, nauwelijks milieuschade zal hebben aangericht. Het risico is eerder dat van het hellende vlak: als deze ongereguleerde proef niet wordt bestraft, is het een kwestie van tijd voordat de volgende drieste klimaatengineer het groter aanpakt. En dus riskanter.

En de indianen van Old Massett? Geschrokken door het internationale tumult verklaarde hun opperste raad drie dagen na het artikel in *The Guardian* dat de Haida-natie (bestaande uit Old Massett en nog één andere gemeenschap) afstand nam van het experiment. Of hun aanzienlijke investering in herstel van de zalmtrek zal resulteren, staat op dit moment nog te bezien. Naar inkomsten uit koolstofkredieten kunnen ze in ieder geval fluiten.

Voornaamste bronnen:

De *Guardian*-primeur, met de citaten van Gjerde en Ribeiro, staat op <http://goo.gl/DvWDi>.

Een bruikbaar overzicht staat in *Nature*, <http://goo.gl/21ouy>.

De uitspraken van Edward Parson staan in *Science*, <http://goo.gl/jDqJa>.

De partijen bij het Verdrag van Londen hebben hun zorg uitgesproken in een persbericht dat op de IMO-website staat: <http://goo.gl/fwYGw>.

Een goed artikel over de wetenschappelijke kant van het experiment is <http://goo.gl/laKGh>.

De beweringen van HSRC dat het bedrijf uitvoerig met de Canadese overheid zou hebben samengewerkt worden aangehaald in <http://goo.gl/1Y2om>.

De website van Environment Canada is <http://www.ec.gc.ca>.

Meer bronnen op <http://www.climate-engineering.eu/single/items/press-review-iron-fertilization-in-canada.html>

5.5.4 Verdrag van Londen

Het Verdrag van Londen (inzake de voorkoming van verontreiniging van de zee ten gevolge van het storten van afval en andere stoffen) uit 1972³³ en het bijbehorende Protocol uit 1996 verbiedt de dumping van elke vorm van afval (zeer ruim gedefinieerd als 'materialen en substanties, ongeacht hun aard, vorm of omschrijving', artikel 1 lid 8). Een uitzondering betreft het lozen op zee van CO₂ afkomstig van CO₂-opvang en -opslag (Carbon Capture and Storage, CCS). Hiermee is het Verdrag van Londen met name van toepassing op ijzerfertilisatie en enhanced weathering in oceanen. Nadat de partijen bij het verdrag in 2007 een zogenoemd 'Statement of Concern' over ijzerfertilisatie hadden aangenomen, werd in 2008 een resolutie aangenomen over de regulering hiervan.³⁴ In deze resolutie is vastgelegd dat oceanbemesting onder het Verdrag en Protocol van Londen valt en dat deze vorm van klimaatengineering niet is toegestaan gegeven de huidige kennis over de effecten ervan. Wel is kleinschalig wetenschappelijk onderzoek toegestaan binnen het in 2010 vastgestelde toetsingskader.³⁵ Elk experiment, hoe klein ook, dient de regels van dit toetsingskader te volgen. Vooraf moet een milieubeoordeling worden uitgevoerd van de te verwachten effecten. Onderzoeksresultaten moeten zoveel mogelijk worden gepubliceerd in peer-reviewed wetenschappelijke tijdschriften, zodat ze openbaar toegankelijk zijn en de wetenschappelijke kwaliteit gewaarborgd is.³⁶

5.5.5 Conclusie

In het ENMOD-verdrag, het VN-Raamverdrag, het Biodiversiteitsverdrag en het Verdrag van Londen zijn verschillende bepalingen vastgelegd die betrekking hebben op de regulering van klimaatengineering. Allereerst mag klimaatengineering alleen vreedzaam worden ingezet. In geval van een conflict mogen technologieën die onder klimaatengineering vallen niet worden ingezet om het klimaat van de andere partij te beïnvloeden. Volgens de CBD is aantasting van de biodiversiteit niet wenselijk. Het verdrag pleit voor kleinschalige gecontroleerde experimenten voorafgegaan door een onderzoek naar de mogelijke effecten. Ook binnen het Verdrag van Londen is slechts kleinschalig onderzoek toegestaan. Hierbij valt dezelfde kanttekening te plaatsen als bij het internationaal gewoonterecht: om daadwerkelijk iets te kunnen zeggen over de

33 Trb. 2000, 27.

34 Resolutie LC-LP.1 (2008).

35 Resolutie LC-LP.2 (2010).

36 Zie voor de regulering van de onderzoeksfase onder andere: The Asilomar Conference Recommendations on Principles for Trb. 2000, 27.

Resolutie LC-LP.1 (2008).

Resolutie LC-LP.2 (2010).

Zie voor de regulering van de onderzoeksfase onder andere: The Asilomar Conference Recommendations on Principles for Research into Climate Engineering Techniques. Zie: <http://www.climate.org/PDF/AsilomarConferenceReport.pdf>

gevolgen van klimaatengineering is het noodzakelijk het onderzoek op te schalen, en dat is nu juist niet toegestaan.

5.6 Algemene (milieu)verdragen die van invloed zijn op klimaatengineering

In bovenstaande paragraaf ging het om verdragen die specifiek van toepassing zijn op klimaatengineering. Naast deze verdragen zijn er ook algemene verdragen die van toepassing zijn op specifieke technologieën op het gebied van klimaatengineering, zonder dat dit bij het opstellen van deze verdragen was voorzien.

In onderstaande paragraaf worden zes verdragen besproken. De bekendste hiervan zijn het Verdrag betreffende grensoverschrijdende luchtverontreiniging over lange afstand (CLRTAP)³⁷ en het Verdrag betreffende de bescherming van de ozonlaag³⁸ (Verdrag van Wenen) en het bijbehorende Protocol van Montreal.³⁹ Beiden zijn van toepassing op SAI. Daarnaast komen aan de orde: het Ruimteverdrag, het Espoo-verdrag over milieuraapportages, het VN-Zeerechtverdrag (UNCLOS) en het OSPAR-verdrag over het mariene milieu in de noordoostelijke Atlantische Oceaan.

5.6.1 Verdrag betreffende grensoverschrijdende luchtverontreiniging over lange afstand (CLRTAP)

Het Verdrag betreffende grensoverschrijdende luchtverontreiniging over lange afstand (CLRTAP) uit 1979 richt zich op alle vormen van luchtverontreiniging. Deze term is gedefinieerd als de antropogene emissie van stoffen of energie voor zover deze leidt tot nadelige effecten, zoals gezondheidsschade, schade aan ecosystemen of aan materiële bezittingen (artikel 1(a)). Deze schadelijke vormen van luchtverontreiniging moeten volgens het verdrag geleidelijk worden teruggedrongen (artikel 2). Voor een groot aantal specifieke stoffen gelden protocollen: vergaande, bindende afspraken die moeten leiden tot emissiereducties. Dit geldt bijvoorbeeld voor zwavel: in 1993 moest een emissiereductie van dertig procent zijn bereikt ten opzicht van het niveau van 1980.⁴⁰ Nieuwe zwavelemissies als onderdeel van SAI moeten dus binnen dit plafond blijven.⁴¹ Opvallend is dat de Verenigde Staten het protocol over zwavelstoffen niet hebben ondertekend, terwijl ze wel partij zijn bij CLRTAP.

37 Trb. 1980, 21.

38 Trb. 1985, 144.

39 Trb. 1988, 11.

40 Trb. 1985, 148.

41 Volgens de relevante literatuur zou dit geen enkel probleem zijn, omdat het bij SAI om een relatief kleine hoeveelheid extra zwavelemissie zou gaan in vergelijking tot het gestelde plafond (Bodansky 2011, p. 18).

De EU heeft een aantal luchtkwaliteitsrichtlijnen opgesteld om dit verdrag uit te voeren. De focus van de belangrijkste richtlijn (Richtlijn 2008/50/EG betreffende luchtkwaliteit en schonere lucht voor Europa) ligt op het menselijk leefniveau. Ook voor zwaveldioxide zijn luchtkwaliteitsdoelstellingen op leefniveau vastgesteld. Dit betekent dat de richtlijn in eerste instantie niet van toepassing is op SAI, omdat er bij deze technologie sprake is van zwavemissie in de stratosfeer (dat wil zeggen in de hogere luchtlagen). Als er uitwisseling zou zijn van de stratosfeer naar de troposfeer, kan de richtlijn weer relevant worden. Dit geldt dan tevens voor de Nederlandse milieuwetgeving die een implementatie vormt van deze richtlijn, in het bijzonder de luchtkwaliteitseisen op basis van de Wet milieubeheer.

Daarnaast is de Richtlijn inzake nationale emissieplafonds voor bepaalde luchtverontreinigende stoffen van belang (Richtlijn 2001/81/EG, de NEC-richtlijn). Deze richtlijn beperkt de emissie van een aantal stoffen, waaronder zwaveldioxide, door iedere lidstaat. De richtlijn gaat alleen over emissies op het grondgebied van de lidstaten. CLRTAP maakt formeel geen onderscheid tussen stratosfeer en troposfeer en heeft een erg brede werking. Daarom wordt er in de literatuur van uitgegaan dat dit verdrag van toepassing is op SAI (Bodanksy 2011, p.18; Zedalis 2010, p. 21). Wij vragen ons echter af of deze opvatting correct is. De opstellers van de Richtlijn hebben luchtverontreiniging op leefniveau voor ogen gehad. Hierdoor is de Richtlijn volgens ons niet van toepassing op SAI en lijken emissies in de stratosfeer opnieuw niet gereguleerd te zijn.

5.6.2 Verdrag van Wenen en Protocol van Montreal

Het Verdrag van Wenen betreffende de bescherming van de ozonlaag uit 1988 en het bijbehorende Protocol van Montreal richten zich op de bescherming van de ozonlaag. Bijna alle landen zijn hier lid van. Het Protocol van Montreal verbiedt de toepassing van stoffen die de ozonlaag aantasten (cfk's, hcfc's en metylbromide). Zwavelaerosolen vallen daar vooralsnog niet onder. Omdat deze zwavelaerosolen de ozonlaag zouden kunnen aantasten, vallen ze wel onder het Verdrag van Wenen. Dit betekent dat SAI gereguleerd zou kunnen gaan worden door aanpassing van het Protocol van Montreal. Hier is nog geen sprake van.

Aerosolen tegen klimaatverandering: een fictieve casus

Gaston Dorren

Stel, een organisatie genaamd Climate Repair Initiative (CRI) zou besluiten aerosolen in de stratosfeer te injecteren, om te onderzoeken in hoeverre zo'n ingreep klimaatverandering tegengaat. Aan welke wetten en regels zou CRI dan moeten voldoen? En wat als het dat niet doet? CRI is in de eerste plaats gebonden aan de wetten van het land waar het is gevestigd. CRI is fictief, dus laten we het ook in een fictief land plaatsen: Mazorda, een eiland ergens tussen Ierland en Canada. De nationale milieuwetten zijn aan de soepele kant en worden niet al te streng gehandhaafd, maar Mazorda heeft de meeste internationale milieuverdragen braaf getekend.

Dit experiment met stratosferische aerosolinjectie (SAI) is juridisch gezien niet bij voorbaat kansloos. Er is geen verdrag dat wetenschappelijk praktijkonderzoek naar klimaatbeïnvloeding ronduit verbiedt. Anderzijds kan CRI ook niet zomaar zijn gang gaan. Of juister gezegd: Mazorda mag niet toestaan dat CRI zomaar zijn gang gaat - de verplichtingen van internationale verdragen gelden niet rechtstreeks voor burgers, maar voor overheden, die moeten zorgen dat de verdragen nageleefd worden.

Aan welke voorwaarden moet CRI in ieder geval voldoen? De belangrijkste, maar meteen ook een lastige, is dat CRI een milieueffectrapportage moet opstellen. Dat is verplicht op grond van het no harm-beginsel, een principe uit het internationale gewoonterecht dat inmiddels bindende kracht heeft verworven. Bovendien verplicht het verdrag van Espoo Mazorda om zo'n m.e.r. te eisen. Mazorda ligt dan wel een eind buitengaats, het is zeer wel denkbaar dat het SAI-experiment het weer in andere landen beïnvloedt, misschien ten goede, maar potentieel ook ten kwade. De mogelijke schade moet vooraf worden ingeschat en afgewogen tegen de verwachte voordelen van het project. Ook moet bezien worden of de voordelen niet op een andere, minder schadelijke of riskante manier verkregen kunnen worden. In deze Mazordaanse m.e.r.-procedure heeft de bevolking van gebieden die door het experiment getroffen kunnen worden, het recht om mee te praten. En op grond van het VN-Raamverdrag moet Mazorda ook nog eens afwegen of het experiment niet toekomstige generaties schaadt.

Het lastige aan dit alles is dat de vragen moeilijk te beantwoorden zijn, omdat de wetenschappelijke kennis omtrent SAI nog grote leemtes vertoont. Tegelijk beoogt het experiment nou juist om die leemtes te helpen vullen. Enige kennis bestaat er overigens wel: de uitbarsting van de vulkaan Pinatubo in 1991 was een soort natuurlijk experiment, dat aardig wat inzicht heeft opgeleverd in het gedrag van aerosolen in de stratosfeer en in de klimaateffecten daarvan.

Waarschijnlijk zal een positieve m.e.r.-uitkomst een kwestie van maatvoering zijn. CRI kan maar beter klein beginnen: bescheiden proeven zullen minder risico opleveren, maar al wel helpen om kennisleemtes te vullen. Naarmate het wetenschappelijk inzicht toeneemt, is beter te beoordelen welke grotere experimenten veilig (en nuttig) zijn. Internationale regels stellen overigens nog twee eisen aan het werk van CRI. Ten eerste eist het ENMOD-verdrag - dat milieuveranderende activiteiten voor vreedzame doelen expliciet toestaat - dat landen hun kennis hierover delen met andere landen, en de kennis ook inzetten voor milieuverbetering; Mazorda moet dat dus van CRI eisen. Ten tweede mag CRI niet ongebreideld alle mogelijke stoffen in de stratosfeer injecteren. Op dit moment worden enkele zwavelverbindingen het meest genoemd als bruikbare aerosolen, maar andere stoffen zijn denkbaar, en misschien ook wel efficiënter als 'broeikaskoeler'. Deze stoffen zouden de ozonlaag kunnen aantasten, maar zeker niet in gelijke mate; hierover bestaat nog weinig kennis. Aangezien het Protocol van Montreal slechts een beperkt aantal stoffen reguleert, is stratosferische injectie van andere stoffen niet verboden. Mocht het aan de orde zijn, dan kunnen de verdragspartijen zo'n verbod wel vrij snel regelen. Onderzoek naar een 'broeikaskoeler' die de ozonlaag ernstig aantast is dus voor CRI weinig zinvol, zowel ecologisch als juridisch bezien. Een ander verdrag reguleert de emissies van zwavelverbindingen wel, namelijk CLRTAP (Verdrag betreffende grensoverschrijdende luchtverontreiniging over lange afstand). Er is enige discussie of emissies naar de stratosfeer al dan niet onder dit verdrag vallen. Anderzijds zal een experiment niet zo veel aerosolen in de atmosfeer brengen dat het verdrag zich ertegen moet verzetten. Als in een later stadium grotere hoeveelheden de lucht in gaan, zou dat wel op gespannen voet kunnen komen te staan met CLRTAP.

De vraag die overblijft is deze: wat gebeurt er als de Mazordaanse overheid zich aan haar verplichtingen niets gelegen laat liggen en CRI in alle opzichten zijn gang laat gaan? Dat hangt er vooral van af hoeveel politiek tumult er over de CRI-kwestie ontstaat. Sowieso kunnen andere landen Mazorda aanspreken op zijn verdragsverplichtingen. Wat de m.e.r.-procedure betreft: omdat die verplicht is onder het Verdrag van

Espoo, is de bindende geschillenprocedure van kracht die daarin vermeld staat (mits Mazorda zich daarvoor heeft aangemeld).

Loopt het conflict op en is Mazorda niet voor rede vatbaar, dan kan het hele arsenaal van de internationale politiek van stal worden gehaald, van ambassadeurs terugroepen en handelssancties en oorlog. Maar de kans dat een project als dit zulke grote gevolgen zal hebben, is te verwaarlozen.

5.6.3 Ruimteverdrag

Het Ruimteverdrag uit 1967 heet voluit: 'Verdrag inzake de beginselen waaraan de activiteiten van Staten zijn onderworpen bij het onderzoek en gebruik van de kosmische ruimte, met inbegrip van de maan en andere hemellichamen.' Het verdrag heeft betrekking op alle menselijke activiteiten in de ruimte en is daarmee van toepassing op de plaatsing van spiegels in de ruimte.⁴² De volgende bepalingen zijn relevant voor deze technologie:

- Onderzoek en gebruik van de ruimte moeten plaatsvinden ten voordele en in het belang van alle landen en er is vrijheid van wetenschappelijk onderzoek in de ruimte, waarbij staten internationale samenwerking vergemakkelijken (artikel I).
- Staten die partij zijn bij het verdrag dragen internationale verantwoordelijkheid voor nationale activiteiten in de ruimte, ook als dat gebeurt door private partijen ('non-gouvernementele lichamen'), en moeten ervoor zorgen dat de bepalingen uit het verdrag worden nageleefd. Private organisaties hebben toestemming nodig van de staat waaruit ze afkomstig zijn en vallen onder voortdurend toezicht van die staat (artikel VI).
- Staten zijn aansprakelijk voor schade die veroorzaakt wordt door een onder hun verantwoordelijkheid gelanceerd voorwerp (artikel VII).
- Onderzoek in en naar de ruimte moet gebeuren conform het beginsel van samenwerking en onderlinge bijstand en mag niet leiden tot 'schadelijke besmetting ervan' of tot 'nadelige veranderingen in de omgeving van de aarde'. Dit is een wat ongelukkige vertaling van de oorspronkelijke tekst van het verdrag, waarin gesproken wordt van 'adverse changes in the environment of the Earth' (artikel IX).

Zoals inmiddels bekend zullen de voor- en nadelen van klimaatengineering niet evenredig verdeeld zijn. Vormen van SRM zullen naar alle waarschijnlijkheid altijd tot nadelige effecten leiden, en dus tot schade. Uit het derde punt zou je kunnen afleiden dat de ene staat de andere staat aansprakelijk zou kunnen stellen voor schade veroorzaakt door de plaatsing van spiegels in de ruimte. Eerder in dit hoofdstuk bleek echter dat het zeer problematisch is om een land

42 Trb. 1967, 31. Bij dit verdrag zijn 101 landen partij.

aansprakelijk te stellen voor schade veroorzaakt door klimaatengineering. Het causale verband tussen de activiteit en de geleden schade is over het algemeen niet te bewijzen. Daarom zal artikel VII geen concrete beperking betekenen voor deze vorm van SRM. Ditzelfde geldt voor de 'schadelijke besmetting' of 'nadelige veranderingen in de omgeving van de aarde' van artikel IX.

In Nederland wordt het Ruimteverdrag uitgevoerd met de Wet ruimtevaartactiviteiten uit 2007. Deze wet bepaalt dat ruimteactiviteiten aan een vergunningplicht zijn verbonden. De vergunning kan worden geweigerd als de bescherming van het milieu in de ruimte in gevaar kan worden gebracht (artikel 6 lid 1(b)). Aan een wel verleende vergunning kunnen voorschriften worden verbonden die bedoeld zijn ter bescherming van het milieu in de kosmische ruimte (artikel 3 lid 3).

5.6.4 Espoo-verdrag

Uit eerdere paragrafen bleek al dat sommige verdragen voor de uitvoering van potentiële milieubelastende activiteiten een milieueffectrapportage (m.e.r.) vereisen. De m.e.r. garandeert dat al tijdens de voorbereiding van activiteiten en vóór de vaststelling ervan rekening gehouden wordt met de mogelijke effecten. Op internationaal niveau bestaat hiervoor het Verdrag inzake milieueffectrapportage in grensoverschrijdend verband, het Espoo-verdrag.⁴³ Dit verdrag trad in 1997 in werking. Rusland heeft weliswaar getekend, maar niet geratificeerd. Als landen activiteiten uitvoeren die een grensoverschrijdend effect hebben, moeten ze landen die hier nadelige effecten van kunnen ondervinden zo vroeg mogelijk op de hoogte stellen. Deze notificatie moet alle relevante informatie over de activiteit bevatten met een redelijke termijn waarbinnen gereageerd kan worden. Ook moeten burgers de kans krijgen hun zienswijze te geven. Naar aanleiding hiervan zal de staat waarin de voorgenomen activiteit plaatsvindt in overleg treden met de betrokken geraakte staat en eventueel ook mogelijke alternatieven bespreken.

Ook op EU-niveau bestaat bij voorgenomen activiteiten met significante gevolgen voor het milieu de verplichting een m.e.r. te maken. Naast de voorgenomen activiteiten moeten ook redelijke alternatieven worden omschreven. De lidstaten moeten de betrokken instanties en het publiek hiervan op de hoogte brengen en relevante informatie openbaar maken.

Aangezien alle hier behandelde SRM-varianten en ook ijzerfertilisatie mogelijk nadelige gevolgen kunnen hebben voor andere staten, is het Espoo-verdrag op deze vormen van klimaatengineering van toepassing. Dit betekent concreet dat voor deze activiteiten een m.e.r. moet worden uitgevoerd, waarbij het gezien alle onzekerheden in dit stadium nog erg lastig is de consequenties in

43 Espoo (Finland), 25 februari 1991. Vastgesteld in het kader van de United Nations Economic Commission for Europe (UNECE).

kaart te brengen. Landen zijn er in ieder geval toe verplicht te proberen dit zo goed mogelijk te doen. Door de verplichting alle relevante partijen inclusief burgers te raadplegen, wordt deze informatie ook openbaar. Landen kunnen dus pas grootschalige SRM- of ijzerfertilisatie-experimenten uitvoeren als ze dit zorgvuldig hebben voorbereid en afgewogen. Hetzelfde geldt voor de implementatie van deze technologieën. Die zorgvuldige voorbereiding houdt dus onder meer in dat ze andere staten hiervan op de hoogte moeten stellen.⁴⁴

5.6.5 VN-Zeerechtverdrag (UNCLOS)

Het VN-Zeerechtverdrag is een enorm breed verdrag dat alle aspecten van het internationaal zeerecht behandelt. Ook de participatie is breed bij dit verdrag: bijna alle industriële landen zijn partij, met uitzondering van de Verenigde Staten. Een van de doelen van dit verdrag is de bescherming van het mariene milieu op het extraterritoriale deel van de zee (de *high seas*). Hierdoor vallen ijzerfertilisatie en cloud whitening onder de reikwijdte ervan, aangezien deze laatste vorm van SRM op zee zal plaatsvinden. Hoewel het verdrag vrij oppervlakkig blijft, zijn de volgende juridische uitgangspunten af te leiden uit het verdrag:

- Activiteiten op de high seas moeten ten goede komen aan de mensheid als geheel en moeten worden uitgevoerd met inachtneming van de belangen van ontwikkelingslanden (artikel 140).
- Wetenschappelijk onderzoek mag slechts worden uitgevoerd ten behoeve van de mensheid als geheel en moet worden georganiseerd door de Internationale Zeebodemautoriteit (ISA) of door staten. In dat geval dienen staten met elkaar samen te werken (artikel 143).
- Activiteiten moeten gepaard gaan met maatregelen die het mariene milieu beschermen (artikel 145).
- Staten moeten zorgen voor een effectieve participatie van ontwikkelingslanden bij het uitvoeren van activiteiten op de high seas (artikel 148).

Via UNCLOS probeert de VN toezicht te houden op alle activiteiten op de zee buiten de nationale jurisdictie.

Meer in het algemeen kan gesteld worden dat de VN tot dusver kritisch staat tegenover klimaatengineering op zee. De Secretaris-Generaal van de VN heeft in 2009 aan de Algemene Vergadering (AV) van de VN gerapporteerd dat

44 Dit zijn de plannen of projecten vermeld in de bijlagen I en II bij Richtlijn 85/337/EEG van 27 juni 1985 betreffende de milieueffectbeoordeling van bepaalde openbare en particuliere projecten, en alle plannen en programma's waarvoor uit hoofde van Richtlijn 92/43/EEG van de Raad van 21 mei 1992 inzake de instandhouding van de natuurlijke habitats en de wilde flora en fauna is vastgesteld dat een beoordeling nodig is. Zijn de plannen en programma's bepalend voor het gebruik van kleine gebieden op lokaal niveau of houden zij kleine wijzigingen van de bedoelde plannen of programma's in, dan moeten zij slechts worden beoordeeld indien de lidstaten vaststellen dat zij aanzienlijke milieueffecten kunnen hebben.

klimaatengineering grote aandacht verdient. Hij stelt dat vele vormen van klimaatengineering 'lack proper scientific assessment of their environmental impacts and effectiveness', en dat er met name zorgen bestaan over CO₂-opslag op zee en oceaانبemesting door middel van ijzer. Aanbevolen wordt daarom om de wetenschappelijke kennis over de rol van oceanen bij de regulering van het klimaat en de gevolgen van klimaatengineering op het marine milieu te verbeteren.⁴⁵

Tot concrete verdere stappen is het niet gekomen. De AV heeft eigenlijk niet meer gedaan dan het met instemming begroeten van de hierboven reeds behandelde besluiten over klimaatengineering, zoals ze binnen andere internationale kaders genomen zijn (Verdrag van Londen, Biodiversiteitsverdrag) en van verklaringen waarin klimaatengineering wordt afgewezen. Deze zijn aangenomen tijdens grote internationale conferenties van wetenschappers, zoals de Verklaring van Monaco⁴⁶ en de Verklaring van Valencia,⁴⁷ beide uit 2008.

5.6.6 Verdrag inzake het mariene milieu in de noordoostelijke Atlantische Oceaan (OSPAR)

Ook het Verdrag inzake het mariene milieu in de noordoostelijke Atlantische Oceaan (OSPAR) is van toepassing op het mariene milieu en relevant voor ijzerfertilisatie. Het OSPAR-verdrag werd aangenomen in 1992 en geratificeerd in 1998. Het is een echt (modern) milieuverdrag en daarmee veel gedetailleerder dan het UNCLOS-verdrag. Het stelt het voorzorgbeginsel centraal en reguleert tal van activiteiten die negatieve effecten op het marine milieu van de noordoostelijke Atlantische Oceaan kunnen hebben. Het lozen van stoffen op zee is in zijn algemeenheid verboden, maar al in 2007 is een uitzonderingsregeling gemaakt voor de permanente opslag van CO₂ in de zeebodem.⁴⁸ CO₂-opslag in het water of op de zeebodem blijft verboden. Volgens de partijen zijn dit geen duurzame vormen van opslag.

Expliciete aandacht voor klimaatengineering in het algemeen of ijzerfertilisatie dan wel enhanced weathering in het bijzonder is tot dusver uitgebleven binnen het OSPAR-verdrag. Waarschijnlijk is onenigheid hierover tussen de betrokken

45 Distr. Gen. 19 October 2009, A/64/66/Add. 2, no. 86.

46 Deze verklaring van 155 wetenschappers uit 26 landen stelt bijvoorbeeld: 'So-called geo-engineering strategies that would not aim to restrict future atmospheric CO₂ concentrations would not reduce ocean acidification. Mitigation strategies that aim to transfer CO₂ to the ocean, for example by direct deepsea disposal of CO₂ or by fertilising the ocean to stimulate biological productivity, would enhance ocean acidification in some areas while reducing it in others', zie <http://ioc3.unesco.org/oanet/Symposium2008/MonacoDeclaration.pdf>.

47 Verklaring aangenomen tijdens de World Conference on Marine Biodiversity, met over geo-engineering: 'Emerging human activities, such as geo-engineering of the oceans to mitigate climate change, may deliver negative impacts to marine ecosystems.' Zie <http://www.marbef.org/worldconference/declaration.php>.

48 Artikel 3 lid 2 onder f van Annex II, en artikel 3 lid 3 van Annex III van het OSPAR-verdrag. Wijzigingen als gevolg van OSPAR Decision 2007/2, zie [http://www.ospar.org/documents/DBASE/DECRECS/Decisions/07-02e_Decision%20CO₂%20storage.doc](http://www.ospar.org/documents/DBASE/DECRECS/Decisions/07-02e_Decision%20CO2%20storage.doc)

staten hiervan de oorzaak. In elk geval kan geconcludeerd worden dat ijzerfertilisatie het lozen van stoffen omvat en daarmee in beginsel niet is toegestaan. Hetzelfde geldt voor enhanced weathering van olivijn.

De EU is een actieve partij bij het OSPAR-verdrag en heeft in 2008 de Kaderrichtlijn mariene strategie aangenomen.⁴⁹ Deze richtlijn vereist dat de lidstaten een 'goede milieutoestand' bereiken in de zee die onder hun jurisdictie valt. Hiervan is sprake wanneer aan een heel scala aan criteria is voldaan. De schadelijke effecten van menselijk handelen moeten bijvoorbeeld tot een minimum worden beperkt. Denk hierbij aan verlies van biodiversiteit, aantasting van het ecosysteem, schadelijke algenbloei en zuurstofgebrek. Daarnaast horen de concentraties van vervuilende stoffen zodanig laag te zijn dat er geen verontreinigingseffecten optreden.⁵⁰ IJzerfertilisatie en enhanced weathering van olivijn in zee zijn moeilijk te rijmen met deze richtlijn.

In Nederland is verontreiniging van de zee gereguleerd via de Waterwet uit 2009. Deze wet bevat een algemeen verbod om zonder vergunning verleend door de minister van Infrastructuur en Milieu stoffen te lozen in de zee (artikel 6.3). Deze Watervergunning zal moeten voldoen aan de normen uit het OSPAR-verdrag en uit de Kaderrichtlijn mariene strategie. Gezien het bovenstaande is het niet aannemelijk dat een vergunning kan worden verleend voor ijzerfertilisatie of enhanced weathering. Daar komt nog bij dat het Nederlandse kustgebied vrijwel geheel beschermd natuurgebied is onder de Europese Natura 2000-regelgeving (Vogelrichtlijn, Habitatrichtlijn). Experimenten zijn daardoor in deze gebieden uitgesloten voor zover ze schadelijke effecten kunnen hebben op de plaatselijke natuurwaarden.

5.6.7 Conclusie

In principe reguleren de algemene milieuverdragen de uitstoot van milieuschadelijke stoffen in de atmosfeer, de ruimte en de zee. Deze milieuverdragen zijn echter niet opgesteld om klimaatengineering te reguleren, waardoor ze zeer beperkt van toepassing zijn op de verschillende hier besproken vormen van klimaatengineering. CLRTAP richt zich op vervuiling op leefniveau en is dus niet van toepassing op SAI. Omdat het Verdrag van Wenen zich niet op zwaveldeeltjes richt, wordt SAI ook niet door dit verdrag gereguleerd. Het Ruimteverdrag reguleert het plaatsen van ruimtespiegels en andere SRM-activiteiten in de ruimte. Deze zijn toegestaan indien dit in alle openheid gebeurt en als het resultaat ten gunste komt van alle landen. Dit laatste geldt ook voor ijzerfertilisatie en enhanced weathering in de oceanen. Deze activiteiten mogen in beginsel echter weer niet plaatsvinden in de noordoostelijke Atlantische Oceaan.

49 Richtlijn 2008/56, PbEG 2008, L164, p. 19.

50 Bijlage 1.

Tabel 5.1. Bestaande regulering van klimaatengineering

	SRM			CDR	
	Cloud whitening	SAI	Spiegels in ruimte	Oceaanbemesting	Versnelde verwerking
Gewoonterecht: - No harm-beginsel - Voorzorgbeginsel - Intergenerationele billijkheid	Staatsaansprakelijkheid lastig (5.3.1). Belangrijke rol bij vaststellen toelaatbaarheid (5.3.2). Beginselen van internationaal milieurecht stellen randvoorwaarden aan ontwikkeling (5.3.3).				
Mensenrechtenverdrag	Weinig aandacht besteed aan de rol van mensenrechtenverdragen bij klimaatengineering (5.4)				
Specifieke aandacht voor klimaatengineering in verdragen: - ENMOD - UNFCCC	Enige verdrag dat expliciet betrekking heeft op SRM en CDR (5.5.1). (Nog) geen verwijzing naar klimaatengineering, voorkomen klimaatverandering is wel doelstelling van UNFCCC (5.5.2).				
- Biodiversiteitsverdrag - Verdrag van London en Protocol				Oceaanbemesting en versnelde verwerking, niet toegestaan, wel onderzoek (5.5.3 en 5.5.4).	
Algemene (milieu)verdragen - CLRTAP plafond voor zwavelemisies EU-kwaliteitsrichtlijn voor troposfeer - Verdrag van Wenen Montreal Protocol - Ruimteverdrag - Espooverdrag - UNCLOS en OSPAR	SAI binnen dit plafond (5.6.1). SAI in stratosfeer. Van toepassing op SAI. SRM in ruimte. Juridische uitgangspunten voor cloud whitening (5.6.5 en 5.6.6).			Relevant voor oceaanbemesting en enhanced weathering (5.6.5 en 5.6.6)	

5.7 Conclusie

In dit hoofdstuk hebben we allereerst geconcludeerd dat onderzoek naar en implementatie van verschillende technologieën van klimaatengineering enige wijze van regulering vergen. Gezien de grensoverschrijdende effecten van klimaatengineering is het internationaal recht van toepassing.

De vier bestudeerde categorieën van bestaande regulering (het internationale gewoonterecht, mensenrechtenverdragen, specifieke aandacht voor klimaatengineering in (milieu)verdragen, en algemene (milieu)verdragen) zijn in meer of mindere mate van toepassing en lijken in een vangnet te voorzien voor de regulering van klimaatengineering. Er bestaan echter diverse lacunes in het internationaal recht dat van toepassing is op klimaatengineering. Dat is logisch, omdat klimaatengineering nieuwe activiteiten betreft waarop de opstellers van verdragen in het verleden geen oog hebben gehad. Klimaatengineering heeft als nieuw cluster van technologieën nog nauwelijks expliciete aandacht gekregen in het internationale recht.

Wat is nu concreet de betekenis van het internationaal recht voor de in de inleiding genoemde vormen van klimaatengineering: SAI, cloud whitening, spiegels in de ruimte, ijzerfertilisatie en enhanced weathering? Op al deze vormen van klimaatengineering zijn algemene principes, beginselen en procedurele voorwaarden van toepassing, geen enkele technologie wordt expliciet verboden. Deze zijn neergelegd in het internationaal gewoonterecht, mensenrechtenverdragen en het ENMOD-verdrag.

De sleutelbegrippen bij de implementatie van klimaatengineering zijn volgens het internationaal recht openheid en transparantie. Als staten tot de uitvoering van klimaatengineering besluiten, moeten ze met gepaste zorgvuldigheid handelen. Ze mogen geen schade toebrengen aan het milieu van andere staten of gebieden buiten hun nationale jurisdictie, zoals de Noordpool. Staten moeten eerst de onzekerheden en risico's in kaart brengen en eventuele alternatieve opties onderzoeken. Dit onderzoek dient gestructureerd plaats te vinden in de vorm van een milieubeoordeling, in Europa een milieueffectrapportage. Er dient ook kennisuitwisseling plaats te vinden. Dit betekent dat als een land kennis verwerft over klimaatengineering, bijvoorbeeld door het opstellen van een nationaal of Europees onderzoeksprogramma, deze kennis openbaar gemaakt wordt. Hierdoor lopen andere landen geen kennisachterstand op, waardoor ze onvoldoende gemotiveerd zouden kunnen meepraten. Andere staten horen namelijk geraadpleegd te worden voordat er überhaupt sprake kan zijn van enige vorm van toepassing. In dit overleg moeten in ieder geval mogelijke (onzekere) risico's in kaart worden gebracht en mogelijke alternatieven worden besproken. Ook belanghebbenden en milieuorganisaties horen bij de besluitvorming betrokken te worden, net als de bevolking van de betrokken landen.

Volgens het ENMOD-verdrag dient er expliciet rekening gehouden te worden met de behoeften van ontwikkelingslanden. Een technologietransfer van westerse naar ontwikkelingslanden kan hier deel van uitmaken. De VS hebben het ENMOD-verdrag niet ondertekend, terwijl het een van de landen is die veel onderzoek doet naar klimaatengineering.

Naast deze procedurele voorschriften worden de verschillende technologieën ook door meer specifieke verdragen gereguleerd.

Stratospheric Aerosol Injection

SAI wordt momenteel niet expliciet gereguleerd. Bestaande verdragen bieden mogelijkheden tot regulering, maar dit is nog niet aan de orde geweest. SAI wordt in principe in de stratosfeer toegepast. Als er sprake is van een uitwisseling van zwavel naar de troposfeer stelt CLRTAP grenzen aan de maximale zwavelemissie. In hoeverre dit beperkend is voor een effectieve uitvoering van SAI is vooralsnog onduidelijk. Omdat zwavel een stof is die de ozonlaag aantast, zou het Verdrag van Wenen en het Protocol van Montreal kunnen worden aangepast zodat SAI in dit kader wordt gereguleerd. Dit zou eventueel de

toepassing van SAI kunnen inperken. Vooralsnog is dit echter niet aan de orde. Zowel onderzoek naar als implementatie van SAI worden niet ingeperkt, mits bovenstaande procedures in acht worden genomen.

Cloud whitening

Bij cloud whitening wordt water met zoutdeeltjes in wolken gespreid door middel van mechanische installaties op zee. Hierdoor worden de geïnjecteerde wolken witter, waardoor ze meer zonlicht reflecteren. Omdat het hier niet om verontreinigende stoffen gaat, zijn de verdragen over luchtverontreiniging niet van toepassing op cloud whitening. Omdat de uitvoering op zee plaatsvindt, valt cloud whitening wel onder het UNCLOS-verdrag. Ook hierbij is het een voorwaarde dat de techniek ten gunste komt van de mensheid als geheel en dat de belangen van ontwikkelingslanden (dus) in acht worden genomen. Dat geldt eveneens voor wetenschappelijk onderzoek naar cloud whitening.

Spiegels in de ruimte

Het plaatsen van spiegels of andere voorwerpen in de ruimte wordt gereguleerd door het Ruimteverdrag. Deze vorm van klimaatengineering mag alleen plaatsvinden als dit ten gunste komt van alle landen. Omdat niemand weet of dit het geval is, zou besluitvorming hierover door alle staten gezamenlijk moeten plaatsvinden. Nu is het gezien de hoge kosten van deze technologie niet te verwachten dat er landen zijn die deze operatie zelfstandig zouden kunnen uitvoeren. De kans hierop is dan ook niet bijster groot. Hetzelfde geldt voor private partijen. Zij hebben in principe toestemming nodig van de staat van waaruit ze opereren om spiegels in de ruimte te plaatsen. Het is private partijen dus niet toegestaan om deze technologie op eigen houtje toe te passen, maar door de kosten en de schaal van zo'n operatie is dat überhaupt geen waarschijnlijk scenario. De regulering van het plaatsen van spiegels in de ruimte lijkt hiermee weinig problematisch.

Enhanced weathering

Enhanced weathering wordt voor zover dit in het water plaatsvindt gereguleerd door het Verdrag van Londen en het OSPAR-verdrag. In principe is het lozen van stoffen op zee verboden, en enhanced weathering dus ook. De vraag is in hoeverre enhanced weathering daadwerkelijk schade toebrengt aan ecosystemen.

IJzerfertilisatie

Naar ijzerfertilisatie van oceanen is het meeste onderzoek verricht en deze vorm van klimaatengineering bevindt zich wat de mogelijkheid tot implementatie betreft in het verste stadium. Het kader over ijzerfertilisatie laat zien dat deze toepassing op beperkte schaal zelfs al heeft plaatsgevonden. IJzerfertilisatie is wel de meest gereguleerde vorm van klimaatengineering en valt onder het CBD, het Verdrag van Londen, UNCLOS en OSPAR. Kleinschalig onderzoek is toegestaan, grootschalige toepassing echter niet. Bij de uitvoe-

ring van het onderzoek moet een toetsingskader worden gevolgd. De onderzoeksresultaten moeten ook nu gepubliceerd worden, en dus openbaar worden gemaakt. Verschillende bedrijven zijn opgericht om ijzerfertilisatie op termijn te commercialiseren door het verkopen van koolstofkredieten Omdat toepassing van ijzerfertilisatie op andere gronden dan voor wetenschappelijk onderzoek vooralsnog niet is toegestaan, is commercialisering ook nog niet mogelijk.

De Russ George-case heeft echter laten zien dat overtreding van de verdragen weinig gevolgen heeft voor de overtreders. Hierbij komen we meteen op de belangrijkste beperkingen van het internationaal recht. Het internationaal recht kent naar zijn aard enkele inherente problemen bij de regulering van activiteiten die het mondiale klimaat kunnen beïnvloeden. Zo gelden verdragen enkel tussen de staten die partij zijn bij het verdrag. Wat een niet-aangesloten staat, een privé-persoon of een individueel bedrijf doet wordt niet door het verdrag gereguleerd, in elk geval niet rechtstreeks. Uit de problemen rond de opvolging van het Kyoto-protocol weten we hoe moeilijk het is om alle landen aan boord te krijgen.

Een ander probleem betreft het toezicht op de naleving van het internationale recht en de feitelijke afdwingbaarheid ervan. Ook deze problemen lijken juist bij klimaatengineering belangrijk te zijn en vormen een aandachtspunt bij het ontwikkelen van toekomstig beleid. Ook houdt het huidige reguleringskader onvoldoende rekening met de onzekerheden die inherent zijn aan het onderzoek naar en de implementatie van klimaatengineering. Er geldt een verplichting om door middel van onderzoek ontbrekende kennis over de gevolgen van klimaatengineering in kaart te brengen. Onderzoek kan lang in het lab of op de computer plaatsvinden, maar zal uiteindelijk moeten worden opgeschaald om daadwerkelijk iets te kunnen zeggen over de effecten van klimaatengineering. Grootschalig onderzoek wijkt echter niet af van toepassing, hetgeen weer verboden is zonder dat eerst alle gevolgen in kaart gebracht zijn.

Vooral het voorzorgbeginsel lijkt geschikt om een reguleringskader te scheppen waarbinnen risico's kunnen worden afgewogen. Probleem is echter dat het voorzorgbeginsel niet geconcretiseerd is, en dat het beginsel zowel voor als tegen de toepassing van klimaatengineering kan pleiten. Het beginsel moet daarom worden geconcretiseerd in een norm, waarbij in elk geval onderzoek expliciet wordt toegestaan, omdat de gevolgen van klimaatverandering ernstig kunnen zijn. Wel moeten de (procedurele) waarborgen van het voorzorgbeginsel zelf in acht worden genomen.

6 Slot

Monique Riphagen, Frans Brom

6.1 Inleiding

Klimaatverandering kan grote gevolgen hebben, met name voor de regio's die over onvoldoende middelen beschikken om zich aan te passen aan de gevolgen ervan. Klimaatengineering kan een bijdrage leveren aan de oplossing van dit probleem, maar is met veel wetenschappelijke en maatschappelijke onzekerheden omgeven en kan (afhankelijk van het soort technologie) onvoorziene gevolgen hebben voor klimaat, milieu en leefomgeving. Het is daarom een onderwerp dat veel discussie oproept. Tegenstanders verwijten klimaatengineers een *technological fix* van het klimaatprobleem na te streven, terwijl een verandering van leefstijl voorop dient te staan. Alleen al het praten over klimaatengineering leidt volgens hen de aandacht van mitigatie af, en verlaagt de drempel tot implementatie. De risico's die verbonden zijn aan klimaatengineering zijn onacceptabel en onnodig, want mitigatie kan het probleem oplossen.

Klimaatengineers daarentegen wijzen op de urgentie van het klimaatprobleem en het onvermogen van de – internationale – politiek om klimaatafspraken te maken, laat staan daadwerkelijk uit te voeren. De meeste klimaatengineers delen de opvatting dat mitigatie voorop moet staan, maar wijzen erop dat de maatschappij niet bereid is de onaangename gevolgen van een streng mitigatiebeleid te dragen. Een sterke vermindering van de hoeveelheid fossiele brandstof zou namelijk een negatieve invloed kunnen hebben op onze markteconomie. Klimaatengineers vrezen dat er zich een klimaatscenario kan voordoen dat zo ernstig is dat noodmaatregelen vereist zullen zijn. Als dat klimaatscenario werkelijkheid zou worden, dan moeten we ook klaar zijn om verantwoord in te kunnen zetten op noodkoeling. Eenieder die hier kritische vragen bij stelt, zorgt ervoor dat we met lege handen staan als *tipping points* straks gepasseerd worden en de gevolgen van klimaatverandering heel ernstig blijken te zijn.

Beide partijen zien dat er veel op het spel staat en ontwikkelen hun strategieën vanuit oprechte vrees voor de gevolgen van klimaatverandering. Beide menen het morele gelijk aan hun kant te hebben, omdat ze zich inzetten voor het behoud van een leefbare planeet. Die hoge inzet aan beide kanten maakt de discussie over klimaatengineering erg gecompliceerd.

In internationale verdragen als het Biodiversiteitsverdrag (CBD) wordt gesproken over de regulering van vormen van klimaatengineering die een bedreiging kunnen vormen voor de biodiversiteit. Met betrekking tot het Verdrag van

Londen staat een verbod op de ijzerfertilisatie van oceanen op de agenda. Onlangs heeft werkgroep I van het IPCC een nieuw rapport uitgebracht over de huidige stand van de klimaatwetenschap. In dit rapport wordt tevens gesproken over klimaatengineering (IPCC 2013). Naar aanleiding hiervan zal het onderwerp waarschijnlijk ook op de agenda van de internationale klimaatonderhandelingen, de UNFCCC, komen te staan. Ook in Nederland staat het onderwerp inmiddels in toenemende mate in de belangstelling. Zo heeft het Planbureau voor de Leefomgeving, het nationale instituut voor strategische beleidsanalyses op het gebied van milieu, natuur en ruimte, een paragraaf over klimaatengineering opgenomen in het rapport *Welvaart en Leefomgeving - Horizonscan* (2013). Het instituut noemt hierin de mogelijkheid dat een coalitie van landen die worstelen met de extreme gevolgen van klimaatveranderingen, een voorstel kan doen om de aarde te koelen door middel van klimaat-engineering.

Kortom, het onderwerp klimaatengineering staat inmiddels stevig op de wetenschappelijke en internationale politieke agenda. In dit rapport hebben we het debat over klimaatengineering onderzocht. In dit slothoofdstuk schetsen we de uitdagingen waar de Nederlandse overheid met betrekking tot dit vraagstuk voor staat.⁵¹

6.2 SRM en CDR

Klimaatengineering, of geo-engineering, wordt gedefinieerd als het groot-schalig en intentioneel inzetten van technologieën met als doel klimaatverandering te beperken. Over deze definitie bestaat brede overeenstemming. Binnen deze brede definitie zijn twee vormen van klimaatengineering te onderscheiden. Ten eerste technologieën die zonlicht weerkaatsen, Solar Radiation Management (SRM), en ten tweede technologieën die CO₂ uit de lucht halen, Carbon Dioxide Removal (CDR). Het scala aan technologieën dat onder een van beide categorieën valt, is erg groot. In dit rapport zijn we ingegaan op de acht technologieën die het meest onderzocht zijn en voorsnog het meest realistisch lijken. Wat betreft de SRM-technologieën zijn dit Stratospheric Aerosol Injection (SAI), het bleken van wolken en het plaatsen van ruimtespiegels. Wat betreft de CDR-technologieën zijn dit ijzerfertilisatie van oceanen, het direct uit de lucht halen van en ondergronds opslaan van CO₂ (DAC), grootschalige bebossing, de toepassing van biochar (verkoold plantaardig materiaal) en BECCS (bio-energie met ondergrondse opslag van de vrijkomende CO₂). In alle discussies staat op dit moment centraal dat geen van deze technologieën nu al rijp genoeg is om in de praktijk te worden toegepast. Sommige technologieën bestaan alleen op papier; de grote vraag is of ze ook in de praktijk te realiseren zijn. Een voorbeeld hiervan is het bleken van

51 Een expertmeeting over de governance van klimaatengineering heeft als input gediend voor dit hoofdstuk. Zie bijlage 6 voor het verslag hiervan.

wolken. Andere technologieën zijn technisch verder ontwikkeld, of technisch niet erg ingewikkeld, maar van die technologieën is onvoldoende bekend of ze daadwerkelijk werken (of: wat de effecten van toepassing zijn). Een voorbeeld hiervan is de ijzerfertilisatie van oceanen. En hoewel iedereen het erover eens is dat geen van de technologieën nu onmiddellijk toepasbaar is, is de beoordeling van veel van deze technologieën, inclusief sociale en maatschappelijke effecten, niet onomstreden. Er bestaat geen gedeelde visie van wat er nodig is om tot een adequaat oordeel over de verschillende technologieën te komen.

6.3 Debat over SRM

Ondanks het feit dat de techniek van klimaatengineering nauwelijks ontwikkeld is, wordt er sinds 2006 een stevig wetenschappelijk en politiek debat over klimaatengineering gevoerd. De dominante opvatting van klimaatengineers is dat de toepassing van klimaatengineering acceptabel is als er zich een ernstige klimaatverandering voordoet waarbij feedbackmechanismen in werking worden gezet en de opwarming onomkeerbaar dreigt te worden; het zogenoemde noodscenario. Het gaat hierbij om het koelen van de aarde, dus om de toepassing van SRM, met name SAI. Ook in de onderzochte adviesrapporten (hoofdstuk 2) wordt klimaatengineering voornamelijk bekeken vanuit het noodscenario-frame: het is nodig om nú onderzoek te doen naar klimaatengineering om in geval van grote nood oplossingen voorhanden te hebben. Aan het denken over klimaatengineering vanuit een noodscenario zitten twee kanten. Ten eerste is de toepassing van SRM, ook in geval van nood, niet onomstreden. Daarnaast dekt het denken vanuit een noodscenario maar ten dele de technologische mogelijkheden van klimaatengineering. Het noodscenario heeft namelijk alleen betrekking op SRM-technologieën, want zoals in hoofdstuk 1 duidelijk is geworden, leveren CDR-technologieën geen snelle oplossingen. CDR past dus niet in een scenario voor een acute nood situatie.

Een kleine groep deskundigen is van mening dat SRM op korte termijn moet worden uitgevoerd om het zeeijs van de Noordpool te redden. Anderen spreken over SRM als alternatief voor mitigatiebeleid, zoals Björn Lomborg, directeur van het Copenhagen Consensus Center. Het is immers zeker dat SRM werkt. Bovendien is directe toepassing van de techniek waarschijnlijk veel goedkoper dan mitigatie en vergt SRM geen verandering van leefstijl. Beide opvattingen worden echter niet breed gedeeld.

Moral hazard

Het belangrijkste argument van tegenstanders van de toepassing van SRM is juist dat het mitigatie in de weg kan staan, terwijl mitigatie noodzakelijk blijft. Dit staat bekend als het *moral hazard*-scenario: het idee dat er een technologische oplossing bestaat om de aarde te koelen, zou ertoe leiden dat een verandering van leefstijl en een transitie naar koolstofarme vormen van energieopwekking niet langer als noodzakelijk gevoeld worden. Het moral hazard-

argument is echter problematisch. Ten eerste omdat het ieder persoon die serieus wil nadenken over het oplossen van een mogelijk ernstig probleem, medeverantwoordelijk maakt voor het optreden van dit ernstige probleem. Het lijkt op het argument dat het propageren van condoomgebruik ter bestrijding van de aidsepidemie juist aan die epidemie bijdraagt, omdat het promiscuïteit propageert. Echter, zoals in de aidsdiscussie het gevaar op promiscuïteit een gegeven is waarvan je de gevolgen probeert in te dammen, is in de discussie over klimaatengineering het gevaar op te geringe mitigatie- en adaptatie-inspanningen een gegeven waarvan je de gevolgen probeert in te dammen. De centrale vraag is dus niet een abstracte vraag naar mogelijke negatieve gevolgen van het nadenken over klimaatengineering voor een noodzakelijke transitie, maar het empirische vraagstuk of het nadenken over SRM die noodzakelijke transitie daadwerkelijk vertraagt. Dit is niet eenduidig. Zo kan – als duidelijk wordt wat de mogelijke bijwerkingen en risico's van SRM zijn – het serieus overwegen van deze optie bijdragen aan het serieus nemen van het klimaatprobleem. Als de onderzoekers bereid zijn om zulke drastische maatregelen uit te werken, dan moet het wel een heel groot probleem zijn.

Bovendien zijn er vooralsnog geen aanwijzingen dat het moral hazard-scenario inderdaad zal optreden. In geen van de in dit rapport geanalyseerde rapporten wordt geïmpliceerd dat SRM een snelle en goedkope oplossing voor het klimaatprobleem vormt dat in plaats van mitigatie dient te worden toegepast. Ook in het (vooralsnog beperkte) publieke debat zijn geen aanwijzingen te vinden voor het optreden van moral hazard. Uit de interviews die in dit rapport zijn opgenomen, blijkt dat alle geïnterviewden huiverig staan tegenover de toepassing van SRM. Er wordt in het maatschappelijke en wetenschappelijke debat niet gepleit voor de toepassing van SRM als alternatief voor CO₂-reductie. Het aandragen van SRM als oplossing voor het klimaatprobleem en ter vervanging van mitigatiemaatregelen kan op dermate weinig draagvlak rekenen dat een reële vrees voor moral hazard niet op zijn plaats is.

Nadelen SRM

Desalniettemin is de invoering van SRM voorlopig niet wenselijk. Van alle SRM-technologieën is SAI het meest onderzocht en uit dit onderzoek blijkt dat deze technologie in ieder geval een koelend effect zal hebben. Dit koelende effect kan het grootste gevolg van de stijgende concentratie aan CO₂, de opwarming van de aarde, drastisch beperken. Maar daar is het probleem niet mee opgelost. Ten eerste blijft zich in de atmosfeer een hoge concentratie aan CO₂ opbouwen als alleen SAI wordt toegepast, zonder aanvullend stringent mitigatiebeleid. Deze hoge CO₂-concentratie veroorzaakt onder meer een verzuring van de oceanen, met een groot nadelig effect op deze ecosystemen. SRM doet niet alle gevolgen van de stijgende CO₂-concentraties teniet en is dus geen oplossing voor het klimaatprobleem.

Daarnaast kent SRM belangrijke andere nadelen. SRM grijpt op een onvoorspelbare manier in op het klimaatsysteem van de aarde. De modellen van klimaatwetenschappers zijn een zo getrouw mogelijke benadering van het klimaatsysteem, maar geven slechts bij benadering aan hoe dit systeem precies functioneert. Omdat we hierdoor niet precies weten hoe het klimaatsysteem in elkaar zit, zullen de gevolgen van SRM-ingrepen in belangrijke mate onvoorspelbaar blijven. Zo wijzen modellen uit dat de verwachte koeling gepaard zal gaan met een wijziging van het neerslagpatroon, met mogelijk droogte in Afrika en Azië tot gevolg. Met andere woorden, het is te verwachten dat niet iedereen op aarde in dezelfde mate zal profiteren van de voordelen van klimaatengineering. Verwacht mag worden dat de nadelen de armen in grotere mate zullen treffen dan de rijken. Een precieze voorspelling, laat staan sturing en beheersing van die gevolgen, is op dit moment onmogelijk. Een snelle introductie van SRM staat daarmee op gespannen voet met het vinden van een rechtvaardige oplossing voor het klimaatprobleem. Een van de conclusies in hoofdstuk 4 is dat een verantwoorde invoering van klimaatengineering pas mogelijk is als de risico's en onzekerheden die gepaard gaan met de invoering van SRM niet worden doorgeschoven naar arme landen of naar toekomstige generaties. Vooralsnog kan een dergelijke waarborg niet gegeven worden.

Tot slot kampen we met het terminatieprobleem. Als er zich een hoge concentratie aan CO_2 in de atmosfeer blijft opbouwen, moet de toepassing van SRM gedurende een zeer lange periode gecontinueerd worden. Uit het eerste hoofdstuk van dit rapport bleek dat het duizenden jaren kan vergen voordat CO_2 wordt opgenomen door planten, oceanen en mineraal gesteente. Als SRM de belangrijkste strategie is om het klimaatvraagstuk te reguleren, zal de koeling van de aarde al die tijd gecontinueerd moeten worden. Immers, pas als de CO_2 -concentratie is afgenomen, kan de koeling worden afgebouwd. Uit de klimaatmodellen lijkt te volgen dat een plotselinge stopzetting van SRM tot een versnelde opwarming kan leiden. Aan zo'n versnelde opwarming is het heel lastig aanpassen. Dit betekent dat koeling van de aarde langdurig moet worden volgehouden als er eenmaal een begin mee is gemaakt. Een verantwoorde introductie is daarom afhankelijk van een langdurige mondiale coördinatie. Vooralsnog zijn de instituties die hier verantwoordelijk voor zijn, hier niet toe in staat.

6.4 Regulering van SRM

Gezien de grensoverschrijdende effecten van de SRM-technologieën en de ijzerfertilisatie van oceanen, is internationale regulering van deze technologieën wenselijk. Momenteel is de regulering van klimaatengineering beperkt. Deze technologieën zijn zo nieuw dat ze in geen enkel verdrag expliciet gereguleerd of verboden worden. Enkele technologieën vallen onder bestaande niet-klimaatverdragen. Daarom wordt bij de regulering van deze technologieën het klimaatteffect van deze technologieën en de discussie over nadelen

niet meegewogen. Regulering van klimaatengineering in het VN-Raamverdrag klimaatverandering ligt daarom voor de hand. Gezien de beperkte slagkracht van dit verdrag en de controverse over het onderwerp zal het echter problematisch zijn om alle deelnemende landen op een rij te krijgen. Ook kan het een belasting betekenen voor het onderhandelingsproces over mitigatiebeleid. Het kan wel een platform bieden voor internationale politieke discussie over klimaatengineering en de noodzakelijke institutionalisering als voorwaarde voor toepassing in geval van nood.

Op alle vormen van klimaatengineering zijn in ieder geval de algemene principes, beginselen en procedurele voorwaarden van het internationaal recht van toepassing. Deze behelzen een aantal uitgangspunten die als volgt kunnen worden samengevat:

1. Voordat landen besluiten tot het uitvoeren van SRM-technologieën, moeten eerst alle onzekerheden en risico's in kaart worden gebracht en eventuele alternatieven worden onderzocht, zodat een afgewogen risico-evaluatie mogelijk is.
2. Er moet met gepaste zorgvuldigheid worden gehandeld, zodat het milieu van andere landen niet wordt geschaad.
3. Kennis over de toepassing van klimaatengineering moet breed worden gedeeld en toegankelijk worden gemaakt voor andere landen. Openheid en transparantie zijn hierbij van belang. Dat betekent dat het niet wenselijk is dat SRM-technologieën worden vercommercialiseerd of om redenen van strategische aard verhuuld worden.

Alvorens over te kunnen gaan op toepassing van SRM, moeten deze juridische uitgangspunten gewaarborgd worden.

6.5 Moratorium op SRM

SRM biedt op zichzelf geen oplossing voor het probleem van klimaatopwarming, hoewel het in geval van nood waarschijnlijk effectief kan worden toegepast als noodkoeling. Momenteel is noodkoeling echter niet aan de orde en moeten alle inspanningen gericht zijn op het voorkomen van een zodanig ernstige opwarming dat dergelijke noodgrepen overwogen moeten worden. Vooralsnog is de toepassing van SRM echter niet gewenst. De technologie bevindt zich in een te vroeg stadium om voldoende inzicht te hebben in de gevolgen en nadelige effecten van SRM en een risico-afweging mogelijk te maken. Aan bovenstaande uitgangspunten kan momenteel op geen enkele wijze tegemoet worden gekomen. We weten onvoldoende van de technologie om een governance-structuur voor toepassing te kunnen ontwerpen. De internationale coördinatie die nodig is voor langdurig gebruik van SRM lijkt niet binnen handbereik.

Dit betekent dat de Nederlandse inzet erop gericht moet zijn om in internationaal verband te voorkomen dat landen of regio's SRM toepassen vanuit een regionaal eigenbelang. Ook internationale inspanningen zouden hierop gericht moeten zijn.

6.6 Onderzoek naar SRM

Een verbod op de toepassing van SRM moet zich echter niet richten op het uitvoeren van wetenschappelijk onderzoek. Vooralsnog is het onderzoek naar SRM louter theoretisch van aard en vindt het plaats door middel van modellering en door middel van kleinschalige experimenten in het lab. De komende jaren zijn er nog voldoende kennislacunes die op deze wijze kunnen worden gevuld alvorens dit onderzoek om te willen zetten in praktijkproeven.

Er zijn twee redenen om het onderzoek naar SRM te willen voortzetten:

1. Onderzoek naar SRM verschaft klimaatwetenschappers meer inzicht in het klimaatsysteem.
2. Onderzoek naar SRM geeft inzicht in de effecten en risico's van de toepassing van SRM. Omdat een extreem noodscenario niet uitgesloten kan worden, zijn er omstandigheden denkbaar waarin SRM een rol kan spelen als tijdelijke noodoplossing. Om daar een verantwoorde beslissing over te kunnen nemen, is meer kennis noodzakelijk. Een risk assessment als onderdeel van een onderzoeksprogramma is wenselijk. Het onderzoek moet echter niet louter gericht zijn op technische kennis, maar ook op het opzetten van een goede governance-structuur om een verantwoorde implementatie mogelijk te maken.

Enige regulering van het onderzoek is echter gewenst. Vooralsnog voldoen de Oxford-principes, een set principes die onderzoekers in Oxford hebben opgesteld voor de zelfregulering van klimaatengineering door de wetenschappelijke gemeenschap. In deze regels wordt gepleit voor:

- De open publicatie van de resultaten van wetenschappelijk onderzoek naar klimaatengineering.
- Een onafhankelijk assessment van de impact van klimaatengineering.
- Publieksparticipatie bij de besluitvorming rondom klimaatengineering.
- Regulering van klimaatengineering voor toepassing.

Als het onderzoek naar SRM wordt opgeschaald, is een uitgebreidere en meer verplichtende vorm van regulering nodig.

6.7 Debat over CDR

Het lijkt klimaatwetenschappers en klimaatengineers onwaarschijnlijk dat de internationale gemeenschap de twee graden-emissiereductiedoelstellingen in 2050 kan realiseren (hoofdstuk 1). De twee graden-doelstelling is cruciaal omdat het uitgangspunt van de internationale politiek is dat een temperatuurstijging van twee graden de maximaal aanvaardbare opwarming is. Als de emissiedoelstellingen niet gehaald worden en we toch onder de twee graden opwarming willen blijven, dat moet de CO₂-concentratie op een andere manier naar beneden worden gebracht. In aanvulling op mitigatiebeleid is het dus ook nodig om CO₂ uit de lucht te halen. Alleen dan kunnen ongecontroleerde vormen van opwarming worden voorkomen. Carbon Dioxide Removal is hiermee een aanvulling op de *toolbox* om ongewenste effecten van klimaatverandering te voorkomen.

6.8 Nadelen CDR

De CDR-technologieën liggen echter niet klaar voor toepassing op de plank. Ook dit cluster van technologieën kent nadelige effecten en biedt dus geen gemakkelijke uitweg uit het klimaatprobleem.

Uit het cluster van CDR-technologieën zijn er vijf die in theorie voldoende ontwikkeld zijn om te bespreken. Dit zijn ijzerfertilisatie van oceanen, het direct uit de lucht halen van en ondergronds opslaan van CO₂ (DAC), grootschalige bebossing, de toepassing van biochar (verkoold plantaardig materiaal) en BECCS (bio-energie met ondergrondse opslag van de vrijkomende CO₂). Al deze vijf technologieën kennen hun voor- en nadelen.

Direct Air Capture heeft op het eerste gezicht de minste nadelen. Bij DAC wordt direct CO₂ uit de lucht gehaald en ondergronds opgeslagen. In principe kan deze technologie overal op aarde worden toegepast waar sprake is van een geschikte ondergrondse opslagcapaciteit. Het grootste probleem is dat het proces veel energie kost en voorsnog erg duur is. Deze technologie bevindt zich daarom bij lange na niet in een stadium waarin het ook daadwerkelijk kan worden toegepast. In de komende decennia kunnen we nog niets van DAC verwachten.

Voor biochar en BECCS geldt dat een grootschalige teelt van plantaardig materiaal noodzakelijk is om significante hoeveelheden CO₂ vast te leggen. Maar zoals de discussie over de *biobased economy* duidelijk maakt (Asveld, Est & Stermerding 2011) is het areaal voor grootschalige teelt van plantaardig materiaal niet zomaar voorhanden. Deze plantenteelt moet daarom concurreren om de beschikbare ruimte en zal dus waarschijnlijk niet additief plaatsvinden.

Ook ijzerfertilisatie van oceanen stuit op problemen. De invloed van ijzerfertilisatie op de ecosystemen in de oceanen is onvoldoende duidelijk. Dit is risicovol en kan ook nadelen opleveren voor andere landen. Een verandering in visstand bijvoorbeeld kan effect hebben op het welvaartsniveau van landen die van de visvangst afhankelijk zijn. Daarnaast is het nog maar de vraag of de technologie werkt en of er daadwerkelijk CO₂ wordt opgeslagen (zie het interview met Hein de Baar). In het gunstigste geval wordt wat CO₂ opgeslagen, in het ongunstigste geval worden oceanen ernstig aangetast.

Grootschalige bebossing lijkt een relatief eenvoudige 'technologie' om klimaatverandering te beperken. Ook binnen het huidige mitigatiebeleid is (her)bebossing een middel om de doelstelling te halen. Op het noordelijk halfrond wordt inmiddels veel bos aangeplant. Bosbouw legt echter beslag op schaarse gronden en kan daardoor concurreren met voedselproductie. Maar zelfs in regio's waar de grond minder geschikt is voor voedselproductie roept grootschalige bebossing vragen op. Vanuit het perspectief van CO₂-opslag zou bebossing van het Engelse weidelandschap of van de Nederlandse heidevelden gunstig kunnen zijn. Cultureel en natuurhistorisch roept dit grote vragen op. We doen nu immers alle mogelijke moeite om ervoor te zorgen dat deze heidevelden niet dichtgroeien. Bebossing kan volgens deskundigen de CO₂-emissies ten gevolge van historische ontbossing ongedaan maken, maar niet alle historische emissies (laat staan toekomstige) als gevolg van het verbranden van fossiele brandstoffen.

Ten slotte het verwerken van mineralen als olivijn. Deze methode om CO₂ te binden kent fervente voorstanders (zie het interview met Olaf Schuiling), maar ook voorstanders die wat genuanceerder zijn (zie het interview met Pol Knops). Afhankelijk van de toepassing van olivijn gaat deze optie gepaard met grootschalige mijnbouw en eventueel transport; beide kosten energie. Mogelijke negatieve bijwerkingen van deze processen op het klimaatstelsel of op het milieu zijn (in vergelijking met grootschalige mijnbouw voor bijvoorbeeld grondstoffen) beperkt. Voordat deze methode echt werkzaam kan zijn, moet echter duidelijk worden hoeveel CO₂ er nu eigenlijk mee vastgelegd wordt.

6.9 CDR als aanvulling op mitigatie

Bovenstaande maakt duidelijk dat klimaatengineering in de vorm van CDR geen alternatief vormt voor mitigatie en zeker geen *quick fix* biedt voor het klimaatprobleem. De volumes aan CO₂ die jaarlijks de lucht in worden gestoten, zijn te groot om volledig met CDR te kunnen compenseren. En op den duur zijn de meeste CDR-technologieën eindig, omdat ze zo grootschalig moeten worden toegepast. We kunnen niet onbeperkt doorgaan met het telen van plantaardig materiaal, het bebossen van de aarde of het delven van olivijn. Daarom kan geen enkele CDR-technologie op zichzelf het klimaatprobleem oplossen. Wel is een mix van bovenstaande technologieën een waardevolle en

noodzakelijke aanvulling op mitigatietechnologieën. De noodzaak tot het toepassen van CDR wordt breed gevoeld en toepassing kan rekenen op een breed draagvlak onder stakeholders in het klimaatdebat (de ijzerfertilisatie van oceanen uitgezonderd). Volgens hen moeten CDR-technologieën worden toegevoegd aan de mitigatie- en adaptatie-opties, die stuk voor stuk nodig zijn om het klimaatprobleem te managen en te ernstige gevolgen te voorkomen.

6.10 Onderzoek en regulering

Ook wat betreft CDR is regulering noodzakelijk. Hierbij gaat het niet om het verdragsmatig reguleren of verbieden van de verschillende technologieën. De eventuele nadelen van CDR zijn namelijk niet grensoverschrijdend (ijzerfertilisatie uitgezonderd), en leveren geen onmiddellijke nadelen op voor buurlanden. De grootschalige toepassing van ijzerfertilisatie wordt al gereguleerd door verschillende verdragen.

Om de technologieën beter te kunnen ontwikkelen en om ze aan de mix van mitigatie en adaptatie toe te voegen is het wel wenselijk dat hun gebruik als aanvullend instrumentarium erkend wordt in het VN-Raamverdrag.

Om tot een goede inpassing van CDR-technologieën in het VN-Raamverdrag te komen, moet het effect van een bepaalde CDR-technologie vergeleken kunnen worden met uitstootverlaging; er moet dus via een betrouwbare meting vastgesteld kunnen worden hoeveel CO₂ er met de toepassing van een bepaalde technologie vastgelegd kan worden. Hoeveel ruimte geven CDR-technologieën om de uitstootverlaging over een langere tijd uit te smeren? Die vraag moet binnen het verdrag beantwoord worden, en dat kan pas als deze technologieën geaccrediteerd worden. Dat wil zeggen dat er een normstelsel moet worden opgetuigd over de hoeveelheid CO₂ die per technologie wordt afgevangen. Om tot betrouwbare cijfers te kunnen komen is praktijkonderzoek nodig. Dat wil zeggen onderzoek dat niet uitgaat van de ideale omstandigheden in het lab of achter de computer, maar dat probeert te bepalen wat de bijdrage van CDR-technologieën onder reële omstandigheden is. Een uitgebreid onderzoeksprogramma dat zo is opgezet dat de uitkomsten voor internationale onderhandelingen bruikbaar en betrouwbaar zijn, is nodig om hier een antwoord op te krijgen.

De weg die nu open ligt is er één waarbij de verschillende technologieën één voor één worden opgenomen in het VN-Raamverdrag. Namelijk telkens als de stand van de techniek er klaar voor is en er overeenstemming bestaat over de bijdrage die de technologie kan leveren. Monitoring van deze technologieën en van de eventuele perverse prikkels die opname ervan in het VN-Raamverdrag impliceert, blijft nodig. CDR-technologieën leveren geen werkelijke bijdrage als bijvoorbeeld de teelt van plantaardig materiaal pas mogelijk wordt door eerst een bos te kappen. De toepassing van relatief eenvoudige en goed-

kope CDR-technologieën kan de toepassing van lastige en dure mitigatie-maatregelen nog even uitstellen. In deze zin kan een mix van mitigatie en CDR worden samengesteld. Uit het voorgaande moet duidelijk geworden zijn dat CDR wel extra tijd voor mitigatie kan opleveren, maar dat het de grote volumes aan CO₂-uitstoot niet volledig kan opvangen. De mogelijkheden die CDR-technologieën bieden, zijn eindig.

CO₂-prijs

Omdat de verschillende CDR-opties vooralsnog relatief duur zijn, is toepassing op grote schaal op korte termijn niet te verwachten. Als toepassing van CDR volgens marktmechanismen plaats zou moeten vinden, vormt deze hoge prijs een belemmering. Om een markt voor CDR-technologieën te laten ontstaan is enerzijds verdere ontwikkeling van de technologie nodig, terwijl anderzijds waarschijnlijk ook de CO₂-prijs zal moeten stijgen. Om een succesvolle toepassing van CDR mogelijk te maken, moet in internationaal verband de mogelijkheid worden onderzocht welke instrumenten het meest effectief zijn om de CO₂-prijs te laten stijgen en moeten deze worden toegepast.

Nederland kan een bijdrage leveren door CDR als instrument op de agenda te zetten van de internationale klimaatonderhandelingen in 2015. Het zou bovendien aanbevelingswaardig zijn als Nederland het voortouw neemt door het instellen van een nationaal onderzoeksprogramma. Nederland heeft reeds enige expertise op het gebied van olivijn, biochar, *biobased society* en CCS. De verdere uitbouw van deze onderzoeksgebieden kan Nederland een voor-sprong geven in het ontwikkelen van deze technologieën.

Omdat publieke discussie over klimaatengineering wenselijk is, heeft het Rathenau Instituut dit rapport gepubliceerd. Voordat CDR grootschalig wordt toegepast, verdient het aanbeveling om deze discussie in een brede context van mitigatie en adaptatie te laten plaatsvinden, als onderdeel van de bredere klimaatdiscussie. Dit zal klimaatstakeholders aan het onderwerp klimaatengineering verbinden. Ook verbindt het de klimaatwetenschappers die zich bezighouden met de oorzaken en gevolgen van klimaatverandering met de klimaatengineers. Vooralsnog zijn dit gescheiden werelden, waartussen weinig communicatie plaatsvindt. Een integrale discussie over mogelijke en wenselijke oplossingen van het klimaatprobleem, inclusief klimaatengineering, kan het probleem klimaatverandering opnieuw stevig op de kaart zetten.

Geraadpleegde literatuur

Algemene Rekenkamer (2012). *Aanpassing aan klimaatverandering: strategie en beleid*, 's-Gravenhage: SDU Uitgevers.

Allsopp, M., D. Santillo & P. Johnston (2007). *A scientific critique of oceanic iron fertilization as a climate change mitigation strategy*. Greenpeace Research Laboratories. <http://goo.gl/w.Jory>. - 32 p.

Alterra (2009). *Policy options to respond to rapid climate change*. Wageningen: Alterra.

AMEG (Arctic Methane Emergency Group) (2013). 'Planetary catastrophe is inevitable without geoengineering to cool the Arctic'. www.ameg.me (geraadpleegd 9 juli 2013).

Amsterdam Declaration (2001). 'Challenges of a Changing Earth. Global Change Open Science Conference Amsterdam'. In: *International Geosphere-Biosphere Programme*. <http://www.igbp.net/about/history/2001amsterdamdeclarationonearthsystemscience.4.1b8ae20512db692f2a680001312.html> (geraadpleegd 9 juli 2013).

Anvelt, P. et al. (2011). Zie: GAO (United States Government Accountability Office) (2011).

APS (American Physical Society) (2011). *Direct Air Capture of CO₂ with Chemicals*. <http://goo.gl/M1XSG>.

Asveld L., R. van Est & D. Stermerding (red.) (2011). *Naar de kern van de bio-economie. De duurzame beloftes van biomassa in perspectief*. Den Haag: Rathenau Instituut.

Bellamy, R. et al. (2012). 'A review of climate geoengineering appraisals'. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews-Climate Change* 3, no.6, pp. 597-615. doi: 10.1002/wcc.197.

Birnie P., A. Boyle & C. Redgwell (2009). In: *International Law and the Environment*. Oxford: Oxford University Press.

Black, R. (2010). "'Playing God" with the climate?' In: *BBC Earth Watch*. http://www.bbc.co.uk/blogs/thereporters/richardblack/2010/05/playing_god_with_the_climate.html (geraadpleegd 9 juli 2013).

Black, R. (2011). 'Climate "technical fix" may yield warming, not cooling'. BBC News, 6 april 2011. <http://www.bbc.co.uk/news/science-environment-12983795>.

Bodansky, D. (2011). *Governing Climate Engineering. Scenarios for Analysis*. Harvard Project on Climate Agreements Discussion Paper 11-47. <http://belfer-center.ksg.harvard.edu/files/bodansky-dp-47-nov-final.pdf>.

Bolassina, M.A., Y. Ming & V. Ramaswamy (2011). 'Anthropogenic Aerosols and the Weakening of the South Asian Summer Monsoon'. In: *Science* 334, no. 6055, pp. 502-505. doi: 10.1126/science.1204994.

BPC (Bipartisan Policy Center, Task force on Climate Remediation Research) (2011). *Geoengineering. A National Strategic Plan for Research on the Potential Effectiveness, Feasibility and Consequences of Climate Remediation Technologies*. Washington DC: BPC.

Bracmort, K., R.K. Lattanzio & E.C. Barbour (2011). Zie: CRS (Congressional Research Service) (2011).

Brewer, P.G. (2007). 'Evaluating a technological fix for climate'. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104, no. 24, pp. 9915-9916.

Brom, F.W.A. (2011). 'Thuis in de technologie'. Oratie uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar in de Ethiek van Technology Assessment aan de Universiteit Utrecht vanwege het Rathenau Instituut op dinsdag 12 april 2011.

Brovkin, V. et al. (2011). 'Evaluation of vegetation cover and land-surface albedo in MPI-ESM CMIP5 simulations'. In: *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 5 (2013). doi:10.1029/2012MS000169.

Brownsword, R. (2008). *Rights Regulation and the Technological Revolution*. Oxford: Oxford University Press.

Buck, H.J. (2012). 'Geoengineering: Re-making Climate for Profit or Humanitarian Intervention?' In: *Development and Change* 43, no. 1, pp. 253-270.

Buck, H.J. (2012). 'Climate engineering: spectacle, tragedy, or solution? A content analysis of news media framing'. In: Methmann, C., D. Rothe & B. Stephan (eds.) (2013). *Interpretive Approaches to Global Climate Governance. (De-)Constructing the Greenhouse*. London: Routledge.

Bunzl, M. (2009). 'Researching geoengineering: should not or could not?' In: *Environmental Research Letters* 4, no. 4. doi:10.1088/1748-9326/4/4/045104.

Burns, W.C.G. (2011). 'Climate Geoengineering. Solar Radiation Management and its Implications for Intergenerational Equity'. In: *Stanford Journal of Law, Science & Policy* 4, pp. 39-55.

Cotton, W.R. & R.A. Pielke sr. (2007). *Human Impacts on Weather and Climate*. Cambridge: Cambridge University Press.

Crabbe, M.J.C. (2009). 'Modelling effects of geoengineering options in response to climate change and global warming. Implications for coral reefs'. In: *Computational Biology and Chemistry* 33, no 6, pp. 415-420. doi: 10.1016/j.compbiolchem.2009.09.004.

CRS (Congressional Research Service) (2011). *Geoengineering. Governance and Technology Policy*. Washington DC: Congressional Research Service Report for Congress. [Http://www.crs.gov](http://www.crs.gov).

Crutzen, P. (2006). 'Albedo Enhancement by Stratospheric Aerosol Sulfur Injections. A Contribution to Solve a Policy Dilemma?' In: *Climatic Change* 77, pp. 211-219.

Davies, G. (2011). 'Framing the social, political, and environmental risks and benefits of geoengineering: balancing the hard-to-imagine against the hard-to-measure'. In: *Tulsa Law Review* 46, pp. 101-122.

Dorland, R. van, W. Dubelaar-Versluis & B. Jansen (red.) (2011). *De Staat van het Klimaat 2010*. De Bilt/Wageningen: PCCC.

Duarte, C.M. et al. (2012). 'Tipping Elements in the Arctic Marine Ecosystem'. In: *Ambio* 4, no.1, pp. 44-55.

ETC Group (2010). *Geopiracy. The Case Against Geoengineering*. Ottawa: ETC Group. [Http://www.etcgroup.org](http://www.etcgroup.org).

EurActiv (2013). 'Clean energy progress too slow to limit global warming, warns IEA'. <http://www.euractiv.com/energy/clean-energy-progress-slow-limit-news-519194> (geraadpleegd 9 juli 2013).

European Commission (2009). *White Paper. Adapting to climate change: Towards a European framework for action*. Brussels: European Commission. - 16 p.

European Commission (2013). *Green Paper. A 2030 framework for climate and energy policies*. Brussels: European Commission. - 169 p.

Fleming, J.R. (2010). *Fixing the sky. The Checkered History of Weather and Climate Control*. New York: Columbia University Press.

Fleming, J.R. (2012). 'Will geoengineering bring security and peace? What does history tell us?'. In: *Sicherheit und Frieden*, no. 4.

Fleurke F.M. (2013). *Unpacking Precaution. A study on the application of the precautionary principle in the EU*. Cheltenham: Edward Elgar, forthcoming.

GAO (United States Government Accountability Office) (2010). 'Climate Change. A Coordinated Strategy Could Focus Federal Geoengineering Research and Inform Governance Efforts'. [Http://www.gao.gov/assets/320/310105.pdf](http://www.gao.gov/assets/320/310105.pdf) (geraadpleegd 9 juli 2013).

GAO (United States Government Accountability Office) (2011). *Technology Assessment. Climate Engineering: Technical status, Future Directions and Potential Responses*. Washington DC: GAO 11-71.

Gardiner, S. (2010). 'Is "arming the future" with geoengineering really the lesser evil? Some doubts about the ethics of intentionally manipulating the climate system'. In: Gardiner, S. et al. (eds.) *Climate Ethics. Essential Readings*. New York: Oxford University Press, pp. 284-314.

Gardiner, S.M. (2011). 'Some Early Ethics of Geoengineering the Climate. A Commentary on the Values of the Royal Society Report'. In: *Environmental Values* 20, pp. 163-188.

Ginzky, H. (eds.) (2011). Zie: UBA (Umwelt Bundes Amt) (2011).

Glasbergen, P. & A. Blowers (eds.) (1995). *Perspectives on Environmental Problems* Volume 1.

Goldblatt, C. & A.J. Watson (2012). 'The runaway greenhouse. Implications for future climate change, geoengineering and planetary atmospheres'. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Mathematical Physical and Engineering Sciences* 370, no.1974, pp. 4197-4216. doi: 10.1098/rsta.2012.0004.

Govindasamy, B. & K. Caldeira (2000). 'Geoengineering Earth's radiation balance to mitigate CO₂-induced climate change'. In: *Geophysical Research Letters* 27, no. 14, pp. 2141-2144, 15 July 2000.

Hale, B. (2012). 'The World that Would Have Been. Moral Hazard Arguments Against Geoengineering'. In: Preston, C. (ed.) (2012). *Reflecting Sunlight. The Ethics of Solar Radiation Management*. Lanham MD: Rowman and Littlefield.

Hamer, D. den & J. Vink (2012). *Olivijn legt CO₂ vast in de gemeente Rotterdam. Mogelijkheden voor praktijktoepassingen en klimaatdoelstellingen*. Utrecht:Deltares. <http://goo.gl/NjG0k>.

Hansen, J.E. et al. (2008). 'Target Atmospheric CO₂. Where Should Humanity Aim?' In: *The Open Atmospheric Science Journal* 2, pp. 217-231.

Harvey, F. & D. Carrington (2012). 'Governments failing to avert catastrophic climate change, IEA warns'. [Http://www.guardian.co.uk](http://www.guardian.co.uk) (geraadpleegd 9 juli 2013).

Hekkenberg, M. & S.M. Lensink (2013). *16% hernieuwbare energie in 2020 – wanneer aanbesteden?* ECN. - 43 p.

Hoffert M.I. et al. (1998). 'Energy implications of future stabilization of atmospheric CO₂ content'. In: *Nature* 395, pp. 881-884.

House of Commons Science and Technology Committee (2010). *The Regulation of Geoengineering. Fifth Report of Session 2009-10. Report, together with formal minutes, oral and written evidence*. London: The Stationary Office Limited.

House of Representatives (2010). *Engineering the Climate. Research Needs and Strategies for International Cooperation*. Washington: U.S. Congress, Committee on Science and Technology.

Hulme, M. (2012). 'Climate change. Climate engineering through stratospheric aerosol injection'. In: *Progress in Physical Geography* 36, no. 5, pp. 694-705. doi: 10.1177/0309133312456414.

IEA (2013). *World Energy Outlook Special Report 2013. Redrawing the Energy Climate Map*. Paris: IEA.

IEAGHG (2011). *Potential for Biomass and Carbon Dioxide Capture and Storage. Report by Ecofys for IEAGHG*. Cheltenham: IEAGHG. <http://goo.gl/J26xu>.

IPCC (2007). *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC (2013). *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC 5th Assessment Report*. Genève: IPCC.

Ipsos MORI (2010). *Experiment Earth? Report on a Public Dialogue on Geoengineering*. Swindon: Natural Environment Research Council. - 84 p.

Jackson, J. (2011). 'Geoengineering the planet – crazy idea or technological solution?' In: *Earth Times*. <http://goo.gl/DyaDs>.

Jackson, R. (2011). *Geoengineering and Terrestrial Systems*. IGBP meeting 31 January 2011. Http://aerosol.ucsd.edu/IGBP_07.pdf.

James Martin Geoengineering Ethics Working Group (2010). *Geoengineering Ethics List of Key Ethical Issues [Working Draft], compiled by the James Martin Geoengineering Ethics Working Group*. <Http://www.practicaethics.ox.ac.uk/ht/geoengineering2/main> (geraadpleegd 9 juli 2013).

Jha, A. (2009). 'Investment in geo-engineering needed immediately, says Royal Society'. In: *The Guardian*, September 1 2009.

Kamminga, T.K. (1995). 'Principles of international environmental law'. In: Glasbergen P. & A. Blowers (eds.) (1995). *Environmental policy in an international context, perspectives*. London: Arnold.

KEI (Kiel Earth Institute) (2011). *Large-Scale Intentional Interventions into the Climate System? Assessing the Climate Engineering Debate. Scoping report conducted on behalf of the German Federal Ministry of Education and Research*. Kiel: Kiel Earth Institute.

Keith, D.W. & H. Dowlatabadi (1992). 'A Serious Look At Geoengineering'. In: *EOS* 73, pp. 289-293.

Keith, D.W. (1998). 'Geoengineering Climate'. In: Hassol, S.J. & J. Katzenberger (eds.) *Elements of Change 199*. Aspen Colorado: Aspen Global Change Institute, pp. 83-88.

Keith, D.W. (2000). 'Geoengineering the climate: history and prospect'. In: *Annual Reviews Energy Environment* 25, pp. 245-284.

Köhler, P. et al. (2013). 'Geoengineering impact of open ocean dissolution of olivine on atmospheric CO₂, surface ocean pH and marine biology'. In: *Environmental Research Letters* 8. IOPscience. <http://goo.gl/t6Q4V>.

- Kooijmans, P.H. (2002). *Internationaal publiekrecht*. Deventer: Kluwer.
- Kravitz, B. et al. (2009). 'Acid deposition from stratospheric geoengineering with sulfate aerosols'. In: *Geophysical Research Letters* 36. <http://goo.gl/jtMCS>.
- Latham, J. et al. (2008). 'Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds'. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, no. 366, pp. 3969-3987.
- Latham, J. et al. (2012). 'Marine cloud brightening'. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 370, pp. 4217-4262. Published online 6 August 2012. doi: 10.1098/rstaa.2012.0086.
- Lawrence, M.G. & P.J. Crutzen. (2013). 'The Evolution of Climate engineering research'. In: *Opinio Article, Geoengineering Our Climate Working Paper and Opinion Article Series*. <http://wp.me/p2zsRk-8j>.
- Lee, J.R. (2012). 'Everybody Talks About the Weather and: How We Are Doing Something About It Through Cloud Seeding'. American University, n.n.g.
- Lee, T. et al. (1992). Zie: NAS (National Academy of Sciences) (1992).
- Lempert, R.J. & D. Prosnitz (2011). Zie: RAND Corporation (2011).
- Lenstra, W.J., J. van Doorn & B. Verheggen et al. (2009). *State of the art of mitigation & relation mitigation/ adaptation*. Petten: ECN. - 80 p.
- Lenton, T.M. et al. (2008). 'Tipping Elements in the Earth's Climate System'. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 105, no. 6, pp. 1786-1793.
- Lenton, T. M. & N.E. Vaughan (2009). 'The radiative forcing potential of different climate geoengineering options'. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 9, no.15, pp. 5539-5561. doi: 10.5194/acp-9-5539-2009.
- Long, J. et al. (2011). Zie: BPC (Bipartisan Policy Center) (2011).
- Lovelock, J. (2008). 'A geophysicologist's thoughts on geoengineering'. In: *Philosophical Transactions of The Royal Society A* 366, no. 1882, pp. 3883-3890.
- MacCracken, M.C. (2009). 'On the possible use of geoengineering to moderate specific climate change impacts'. In: *Environmental Research Letter* 4, no. 045107.

Marchetti, C. (1977). 'On geoengineering and the CO₂ problem'. In: *Climatic Change* 1, pp. 59-68.

Marshy, L. (ed.) (2010). Zie: ETC Group (2010).

Matthews, H.D. & K. Caldeira (2007). 'Stabilizing climate requires near-zero emissions'. In: *Geophysical Research Letters* 35, no. 4.

McClellan, J., D.W. Keith & J. Apt. 'Cost analysis of stratospheric albedo modification delivery systems'. In: *Environmental Research Letters* 7, no. 034019, pp. 1-8.

Milne, J.L. & C.B. Field (2012). *Assessment report from the GCEP workshop on energy supply with negative carbon emissions*. <http://goo.gl/XoaOy>
 NAS (National Academy of Sciences) (1992). *Policy Implications of Greenhouse Warming. Mitigation, Adaptation and the Science Base*. Washington DC: National Academy Press.

National Research Council (2011). *America's Climate Choices*. Washington DC: The National Academies Press.

Nerlich, B. & R. Jaspal. 'Metaphors we die by? Geoengineering, metaphors, and the argument from catastrophe'. In: *Metaphor and Symbol* 27, no. 2, pp. 131-147. <http://dx.doi.org/10.1080/10926488.2012.665795>.

New Scientist (2012a). 'Stripping CO₂ from air requires largest industry ever'. Nr. 2859.

New Scientist (2012b). 'Geoengineering with iron might work after all'. Nr. 2874.

New Scientist (2012c). 'Can geoengineering avert climate chaos?' Nr. 2883.

Notz, D. (2009). 'The future of ice sheets and sea ice. Between reversible retreat and unstoppable loss'. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, no. 49, pp. 20590-20595.

Okkerse C.A. (2012). 'Volkenrechtelijke aansprakelijkheid voor schadelijke effecten van zeespiegelstijging als gevolg van klimaatverandering'. In: Brans E.H.P. et al. (eds.) *Naar aansprakelijkheid voor de (gevolgen van) klimaatverandering?* Den Haag: Boom Juridische uitgevers.

Olivier, J.G.J., G. Janssens-Maenhout & J.A.H.W. Peters (2012). *Trends in global CO₂ emissions. 2012 Report*. The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, Ispra: Joint Research Centre.

Olson, R.L. (2011). Zie: WWICS (Woodrow Wilson International Center for Scholars) (2011).

Osofsky, H. (2009). 'Is Climate Change "International"? Litigation's Diagonal Regulatory Role'. In: *Virginia Journal of International Law* 585.

PBL (Planbureau voor de Leefomgeving) (2012a). *Effecten van klimaatverandering in Nederland: 2012*. Den Haag: PBL.

PBL (Planbureau voor de Leefomgeving) (2012b). *Trends in global CO₂-emissions: 2012*. Den Haag: PBL.

PBL (Planbureau voor de Leefomgeving) (2013). *Welvaart en Leefomgeving – Horizonscan*. Den Haag: PBL i.s.m. CPB.

Pidgeon, N. et al. (2012). 'Exploring early public responses to geoengineering'. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, no. 370, pp. 4176-4196.

Pierrehumbert R. (2010). 'Losing time, not buying time'. <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2010/12/losing-time-not-buying-time/>.

Pittman, R.S., S. Henry & E. Hariono (2011). *Human rights approach to trans-national hazardous environmental programs*. Bangkok: 4th International Conference on Human Rights and Human Development.

President's Science Advisory Commission (1965). *Restoring the Quality of our Environment*. Washington DC: The White House.

Preston, C.J. (2013). 'Ethics and geoengineering. Reviewing the moral issues raised by solar radiation management and carbon dioxide removal'. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews-Climate Change* 4, no.1, pp. 23-37. Doi: 10.1002/wcc.198.

RAND Corporation (2011). *Governing Geoengineering Research. A Political and Technical Vulnerability Analysis of Potential Near-Term Options*. Santa Monica: RAND Corporation. http://www.rand.org/pubs/technical_reports/TR846.

Randalls, S. (2010). 'History of the 2° C climate target'. In: *Wires Climate Change* 1, no. 4, pp. 598-605. Doi 10.1002/wcc.62.

Ranjana, M. & H.J. Herzoga (2010). 'Feasibility of air capture'. In: *Energy Procedia*. <http://goo.gl/b1zBM>.

Rasch, P.J. et al. (2008). 'An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols'. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A*

366, pp. 4007-4037. Published online 28 August 2008. Doi: 10.1098/rsta2008.0131.

Rasch, P.J., P.J. Crutzen & D.B. Coleman (2008). 'Exploring the geoengineering of climate using stratospheric sulfate aerosols. The role of particle size'. In: *Geophysical Research Letters* 35, no. 2.

Rayner, S. (2010). 'The Geoengineering Paradox'. In: *The Geoengineering Quarterly* 7.

Reynolds, J.L. (2011). 'The regulation of climate engineering'. In: *Law, Innovation and Technology* 3, no.1, pp. 113-136.

Ricke, K.L., M. Granger Morgan & M.R. Allen (2010). 'Regional climate response to solar-radiation management'. In: *Nature Geoscience* 3, pp. 537-541. Published online 18 July 2010. doi: 10.1038/NGEO915.

Rickels, W., G. Klepper & J. Dovern (eds.) (2011). Zie: KEI (Kiel Earth Institute) (2011).

Robesin, M.A. (2012). 'Who done it? Multicausaliteit en klimaatschade'. In: Brans, E.H.P. et al. (red.) *Naar aansprakelijkheid voor (de gevolgen van) klimaatverandering?* Den Haag: Boom Juridische uitgevers.

Robock, A. (2008). '20 reasons why geoengineering may be a bad idea'. In: *Bulletin of the atomic scientists* 64, no. 2, pp. 14-18, 59, May/June 2008. doi: 10.2968/064002006.

Robock, A., L.Oman & G. Stenchikov (2008). 'Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO₂ injections'. In: *Journal of Geophysical Research* 113, no. D16101, doi:10.1029/2008JD010050. <http://climate.envsci.rutgers.edu/pdf/2008JD010050small.pdf>.

Robock, A. et al. (2009). 'Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering'. In: *Geophysical Research Letters* 36, no. 19. doi: 10.1029/2009gl039209.

Robock A. et al. (2010). 'A test for geoengineering?' In: *Science* 327, pp. 530-531.

Russell, L.M. et al. (2012). 'Ecosystem Impacts of Geoengineering. A Review for Developing a Science Plan'. In: *Ambio* 41, no. 4, pp. 350-369. doi: 10.1007/s13280-012-0258-5.

Salter, S. et al. (2008). 'Sea-going hardware for the cloud albedo method of reversing global warming'. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 366. <http://goo.gl/yzhn9>.

Scholte, S. (2012). *Klimaatengineering in de spotlights*. Den Haag: Rathenau Instituut.

Scholte, S., E. Vasileiadou & A.C. Petersen (2013). 'Opening up the societal debate on climate engineering. How newspaper frames are changing'. In: *Journal of Integrative Environmental Sciences* 10, no.1, pp. 1-16.

Schneider, S.H. (2008). 'Geoengineering: could we or should we make it work?'. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society* 366, no. 1882, pp. 3843-3862.

Schuling, R.D. & P. Krijgsman (2006). 'Enhanced Weathering. An effective and cheap tool to sequester CO₂'. In: *Climatic Change* 74, pp. 349-354. <http://goo.gl/iVq2g>.

Sharp (2011). 'Public understanding of solar radiation management'. In: *Environmental Research Letters* 6, no. 044004, pp. 1-9.

Shepherd, J. et al. (2009). Zie: The Royal Society (2009).

Shepherd, J.G. (2012). 'Geoengineering the climate. An overview and update'. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Mathematical Physical and Engineering Sciences* 370, no.1974, pp. 4166-4175. doi: 10.1098/rsta.2012.0186.

Shrader-Frechette, K. (2011). *What Will Work*. Oxford: Oxford University Press.

Sluijs, J.P. van der, R. van Est & M. Riphagen (2010). *Ruimte voor klimaatdebat. Zicht op interactie tussen klimaatpolitiek, wetenschap en media*. Den Haag: Rathenau Instituut.

Socolow, R. (2012). 'Air Capture, Introduction and Overview'. Presentatie op 7 maart 2012 aan de universiteit van Calgary. <http://goo.gl/OTIdV>.

Stern, N. (2006). *The Economics of Climate Change. The Stern Review*. Cambridge UK: Cambridge University Press.

Stocker, T.F. (2012). 'The closing door of climate targets'. In: *Science Perspectives*. doi: 10.1016/j.jgloenvcha.2006.10.003.

Strand, S.E. & G. Benford (2009). 'Ocean Sequestration of Crop Residue Carbon. Recycling Fossil Fuel Carbon Back to Deep Sediments'. In: *Environmental Science Technology* 43, pp. 1000-1007.

Swart, R. et al. (2009). Zie: Alterra (2009).

Tans P. (2009). 'An Accounting of the Observed Increase in Oceanic and Atmospheric CO₂ and an Outlook for the Future'. In: *Oceanography* 22 , no. 4.

Teesing, N. et al. (2001). *Toegang tot het milieurecht*. Deventer: Kluwer.

Thernstrom, S. (2010). *Engineering Our Attitudes. How Geoengineering Can Inform Our Perspective on Climate Policy*. The American Enterprise Institute. [Http://www.aei.org/article/energy-and-the-environment/climate-change/engineering-our-attitudes/](http://www.aei.org/article/energy-and-the-environment/climate-change/engineering-our-attitudes/) (geraadpleegd 9 juli 2013).

The Royal Society (2009). *Geoengineering the Climate. Science, Governance and Uncertainty*. London: The Royal Society.

The Wingspread Conference (1998). 'Wingspread Statement on the Precautionary Principle'. [www.sehn.org. Http://www.sehn.org/precaution.html](http://www.sehn.org/precaution.html) (geraadpleegd 9 juli 2013).

Toulmin, C. (2009). 'Looking Forward'. In: *Climate Change in Africa*. London: Zed Books.

Trouwborst, A. (2006). *Precautionary Rights and Duties of States*. Leiden/ Boston: Martinus Nijhoff Publishers.

UBA (Umwelt Bundes Amt) (2011). *Geoengineering. Effective Climate Protection or Megalomania?* Dessau-Rosslau: Umwelt Bundes Amt.

UNEP (2012). *The Emissions Gap Report 2012*. Nairobi: United Nations Environment Programme.

UNFCCC (1992). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. Genève: UNEP/IUC.

Victor, D.G. et al. (2009). 'The Geoengineering Option. A Last Resort Against Global Warming?' In: *Foreign Affairs*.

Vaughan, N.E. & T.M. Lenton (2011). 'A review of climate geoengineering proposals'. In: *Climatic Change* 109 (3-4), pp. 745-790. doi: 10.1007/s10584-011-0027-7.

Weiss, E.B. (1978). 'International liability for weather modification'. In: *Climatic Change* 1, no. 3, pp. 267-290.

Weizsäcker, C. von & E.U. von Weizsäcker (1984). *Fehlerfreundlichkeit, in Offenheit – Zeitlichkeit – Komplexität*. In: Kornwachs, K. (ed.). *Zur Theorie der offenen Systeme*. Frankfurt am Main: Campus, pp. 167-201.

Williamson, P. et al. (2012). 'Ocean fertilization for geoengineering. A review of effectiveness, environmental impacts and emerging governance'. In: *Process Safety and Environmental Protection*, 90 (6), pp. 475-488. doi: 10.1016/j.psep.2012.10.007.

WWICS (Woodrow Wilson International Center for Scholars) (2011). *Geoengineering for Decision Makers*. Washington DC: Woodrow Wilson International Center for Scholars.

Zedalis, R.J. (2010). 'Climate Change and the National Academy of Sciences' Idea of Geoengineering. One American Academic's Perspective on First Considering the Text of Existing Agreements'. In: *European Energy and Environmental Law Review* 19, no. 1, pp. 18.

Over de auteurs

Annemarie Bijloos is werkzaam als studie- en scriptiebegeleider. Ze studeerde wijsbegeerte aan de Universiteit van Amsterdam en toegepaste ethiek aan de Universiteit Utrecht. Ze houdt zich bezig met de vraag naar de invulling van individuele en institutionele verantwoordelijkheden in het licht van antropogene klimaatverandering. Haar masterscriptie schreef ze over de verantwoordelijkheidsethiek van de Duitse filosoof Hans Jonas en in het kader van een stage bij de Mr. Hans van Mierlo Stichting (wetenschappelijk bureau van D66) was zij betrokken bij het uitwerken van de politieke richtingwijzer omtrent duurzaamheid. In februari 2014 start ze met een promotietraject aan de Universiteit van Stellenbosch in Zuid-Afrika. Zij zal zich hierin richten op individuele verantwoordelijkheden in de context van onzekerheid en risico, voornamelijk onzekerheden en risico's die verbonden zijn aan technologische ontwikkelingen en antropogene klimaatverandering.

Frans Brom is sinds mei 2007 hoofd Technology Assessment van het Rathenau Instituut. Sinds 1 april 2010 bekleedt hij aan de Universiteit Utrecht de Rathenau Instituut-leerstoel Ethiek van Technology Assessment. Hij is ook voorzitter van de Adviescommissie Wetenschappelijke Integriteit van Wageningen Universiteit & Research centrum, voorzitter van de subcommissie Ethiek en Maatschappelijke Aspecten van de Commissie Genetische Modificatie (www.cogem.net) en voorzitter van Unilevers Central Research Ethics Advisory Group (CREAG). Brom studeerde ethiek aan de Katholieke Theologische Universiteit Amsterdam, met een bijvak rechtsfilosofie aan de Vrije Universiteit Amsterdam. Hij promoveerde in de wijsgerige ethiek aan de Universiteit Utrecht op het proefschrift *Onherstelbaar verbeterd. Biotechnologie bij dieren als een moreel probleem*. In zijn huidige onderzoek richt hij zich op de betekenis van wetenschappelijke en technologische ontwikkelingen voor de samenleving.

Gaston Dorren is wetenschapsjournalist. Hij heeft veel geschreven over duurzaamheidsvraagstukken. De laatste jaren houdt hij zich vooral bezig met de maatschappelijke gevolgen van nieuwe technologie en met het populariseren van taalkunde.

Marcus Düwell is directeur van het Ethiek Instituut van de Universiteit Utrecht. Zijn onderzoek richt zich op vragen over de grondslagen van moraliteit en op de toegepaste ethiek in relatie tot ethische theorie en politieke filosofie. Op dit moment verricht hij onderzoek naar de rol van menselijke waardigheid als basis van de mensenrechten (Vici), naar het concept van praktisch zelfbegrip en naar de rechten van toekomstige generaties. Düwell studeerde filosofie aan de universiteiten van Tübingen en München. Zijn promotieonderzoek ging over de

relatie tussen ethiek en esthetiek. Van 1993 tot 2001 was hij academisch coördinator van het Interdepartmental Centre for Ethics in the Sciences and the Humanities van de Universiteit van Tübingen. Sinds 2001 is hij hoogleraar filosofische ethiek aan de Universiteit Utrecht.

Floor Fleurke is als universitair docent Europees milieurecht verbonden aan Tilburg Law School. Fleurke is lid van drie onderzoeksscholen binnen Tilburg University; het Center for Transboundary Legal Development (CTLD), het multidisciplinaire Tilburg Sustainability Center (TSC) en het Tilburg Institute for Law, Technology and Society (TILT). Haar onderzoek richt zich op internationaal Europees milieurecht, met een specifieke belangstelling voor de relatie tussen technologie, risico en recht.

Vincent van Gool rondt momenteel de researchmaster Philosophy en de master Applied Ethics af aan de Universiteit Utrecht. Voor beide masters richt hij zich op ethische vraagstukken omtrent klimaatverandering. Respectievelijk betekent dit het ontwikkelen van een vrijheid tot burgerlijke ongehoorzaamheid wanneer een adequate reactie op klimaatverandering uitblijft en een verkenning van de afhankelijkheid die kan ontstaan bij de inzet van klimaatengineering.

Edwin Horlings is themacoördinator bij de afdeling Science System Assessment van het Rathenau Instituut. Samen met een team van onderzoekers bestudeert hij een scala aan onderwerpen over de organisatie en werking van de kennisinfrastructuur. Voorbeelden hiervan zijn de financiering van grootschalige onderzoeksfaciliteiten, prioritering en coördinatie in de wetenschap, samenwerkingen in de Triple Helix en de organisatie van transdisciplinair onderzoek om grote maatschappelijke uitdagingen aan te pakken. Horlings werkt bij het Rathenau Instituut sinds oktober 2007. Hij heeft meer dan twintig jaar ervaring in de samenstelling en analyse van grote, complexe datasets. Hij is een expert in scientometrische methoden en statistische analyse. Al meer dan tien jaar is het geven van concrete aanbevelingen voor politiek en beleid de rode draad in zijn werk.

Monique Riphagen is sinds 2008 onderzoeker bij het Rathenau Instituut. Zij organiseerde in 2009 het Nederlandse deel van het wereldwijde burgerpanel World Wide Views on Global Warming, was mederedacteur van het Rathenau-rapport *Ruimte voor klimaatdebat. Zicht op interactie tussen klimaatpolitiek, wetenschap en media* (2010) en leverde een bijdrage aan het boek *Energie in 2030. Maatschappelijke keuzes van nu* (2011). Daarnaast organiseerde ze diverse bijeenkomsten, onder andere over dierproeven en natuurbeleid. Monique studeerde milieuhygiëne in Wageningen (1995) en wijsbegeerte (1996) aan de Radboud Universiteit Nijmegen.

Samantha Scholte is promotiestudent bij het Instituut voor Milieuvraagstukken aan de Vrije Universiteit Amsterdam, waar zij onderzoek doet naar de maatschappelijke waardering van natuur- en cultuurlandschappen. Ze bestudeert hoe verschillende groepen mensen zich tot natuur verhouden en hoe een groter inzicht hierin tot beter milieubeleid kan leiden. Scholte studeerde fysieke geografie aan de Universiteit van Amsterdam en Environment and Resource Management aan de Vrije Universiteit. In het kader van haar studie liep zij in 2012 stage op het Rathenau Instituut, afdeling Technology Assessment.

Bart Verheggen is docent aan het Amsterdam University College en geeft onderwijs in de vakken System Earth, Biogeochemical Cycles, en Energy, Climate and Sustainability. Hij heeft een achtergrond in de milieuhygiëne (MSc Wageningen University, 1996) en atmosferische chemie (PhD York University, Canada, 2004). Verheggen heeft tijdens een verblijf van enkele jaren in Zwitserland postdoctoraal onderzoek uitgevoerd naar de interactie tussen aerosols, wolken en het klimaat. Hij heeft verschillende jaren bij het Energie Centrum Nederland gewerkt op het gebied van luchtkwaliteit, klimaatverandering en duurzaamheid. Gedurende deze periode heeft hij voor het Planbureau voor de Leefomgeving een grote survey opgezet onder internationale wetenschappers over klimaatwetenschap. Verheggen heeft een grote belangstelling voor wetenschapscommunicatie en wetenschappelijke geletterdheid en is een fervent blogger over klimaatverandering, waarbij hij reflecteert op de interactie tussen wetenschap en maatschappij.

Jonathan Verschuuren is hoogleraar aan de Tilburg Law School, afdeling European and International Public Law. Zijn onderzoek richt zich op de samenwerking tussen internationale, Europese en nationale milieuregelgeving. Zijn primaire focus is gericht op klimaatverandering (met name adaptatie aan het veranderende klimaat) en op biodiversiteitsbehoud. Momenteel doet hij onderzoek naar de juridische randvoorwaarden waarbinnen aanpassing van de samenleving aan het veranderende klimaat de komende decennia vorm kan krijgen. In het recente verleden deed Verschuuren onderzoek naar complexe juridische situaties rond beschermde grensoverschrijdende watergebieden. Ook voert hij veel onderzoek uit in opdracht van derden, zoals ministeries, provincies, de Europese Commissie, bedrijven, milieuorganisaties et cetera naar actuele vraagstukken op het terrein van het omgevingsrecht. Hij heeft meer dan tweehonderd publicaties op zijn naam staan, veelal in gerenommeerde internationaal gepubliceerde boeken en tijdschriften.

Begeleidingscommissie

Arthur C. Petersen

Chief Scientist bij het PBL Nederland Milieu (Planbureau voor de Leefomgeving, PBL), hoogleraar Wetenschap en Milieu Public Policy in de IVM Instituut voor Milieuvraagstukken van de Vrije Universiteit Amsterdam.

Jip Lenstra

Energie-expert en Partner bij Ecorys Rotterdam

Maarten van Aalst

Directeur Red Cross Climate Centre

Ronald C.H. Flipphi

Relatie wetenschap/internationaal klimaatbeleid, ministerie van Infrastructuur en Milieu

Jesse L. Reynolds

Promovendus bij European and International Public Law, Tilburg Law School, Tilburg University.

Dankwoord

Bij de totstandkoming van dit rapport zijn veel mensen betrokken geweest. Wij willen hen op deze plaats hartelijk danken voor de prettige samenwerking.

Allereerst gaat onze dank uit naar de leden van de begeleidingscommissie: Maarten van Aalst, Ronald Flipphi, Jip Lenstra, Arthur Petersen, Jesse Reynolds en in het beginstadium van het project Sander Dekker, inmiddels oud-bestuursvoorzitter van het Rathenau Instituut. Zij behoren tot het in Nederland kleine gezelschap dat in meer of mindere mate betrokken is bij het onderwerp klimaatengineering. We hebben interessante discussies gevoerd en ze hebben ons van tal van waardevolle adviezen voorzien. Behalve Lenstra, Petersen en Reynolds leverde ook Gareth Davies een waardevolle bijdrage aan de expertmeeting over de governance van klimaatengineering. Een verslag van deze bijeenkomst is als bijlage in dit rapport opgenomen.

Ook danken we alle stakeholders in het Nederlandse klimaatdebat die we voor deze studie hebben geïnterviewd voor hun medewerking. We hebben ervaren dat hun zorg om en betrokkenheid bij het onderwerp klimaatverandering groot is.

Rinie van Est, coördinator bij het Rathenau Instituut, bedanken we voor het kritische meelesen van de verschillende hoofdstukken van dit rapport.

Tot slot een woord van dank aan Cathalijne Boland, eindredacteur van dit rapport. Zonder haar flexibiliteit hadden we de publicatie ervan niet op tijd kunnen realiseren.

Bijlage 1 Beleidsrelevante toekomstige kantelementen in het klimaatsysteem

Tipping element	Feature of system, F (direction of change)	Control parameter(s), p	Critical value(s), $\dagger p_{crit}$	Global warming $\dagger \Delta T$	Transition timescale, $\dagger T$	Key impacts
Arctic summer sea-ice	Areal extent (–)	Local ΔT_{air} , ocean heat transport	Unidentified [§]	+0.5–2°C	≈10 yr (rapid)	Amplified warming, ecosystem change
Greenland ice sheet (GIS)	Ice volume (–)	Local ΔT_{air}	+≈3°C	+1–2°C	>300 yr (slow)	Sea level +2–7 m
West Antarctic ice sheet (WAIS)	Ice volume (–)	Local ΔT_{air} , or less ΔT_{ocean}	+≈5–8°C	+3–5°C	>300 yr (slow)	Sea level +5 m
Atlantic thermohaline circulation (THC)	Overturning (–)	Freshwater input to N Atlantic	+0.1–0.5 Sv	+3–5°C	≈100 yr (gradual)	Regional cooling, sea level, ITCZ shift
El Niño–Southern Oscillation (ENSO)	Amplitude (+)	Thermocline depth, sharpness in EEP	Unidentified [§]	+3–6°C	≈100 yr (gradual)	Drought in SE Asia and elsewhere
Indian summer monsoon (ISM)	Rainfall (–)	Planetary albedo over India	0.5	N/A	≈1 yr (rapid)	Drought, decreased carrying capacity
Sahara/Sahel and West African monsoon (WAM)	Vegetation fraction (+)	Precipitation	100 mm/yr	+3–5°C	≈10 yr (rapid)	Increased carrying capacity
Amazon rainforest	Tree fraction (–)	Precipitation, dry season length	1,100 mm/yr	+3–4°C	≈50 yr (gradual)	Biodiversity loss, decreased rainfall
Boreal forest	Tree fraction (–)	Local ΔT_{air}	+≈7°C	+3–5°C	≈50 yr (gradual)	Biome switch
Antarctic Bottom Water (AABW)*	Formation (–)	Precipitation–Evaporation	+100 mm/yr	Unclear [¶]	≈100 yr (gradual)	Ocean circulation, carbon storage
Tundra*	Tree fraction (+)	Growing degree days above zero	Missing	—	≈100 yr (gradual)	Amplified warming, biome switch
Permafrost*	Volume (–)	$\Delta T_{permafrost}$	Missing	—	<100 yr (gradual)	CH ₄ and CO ₂ release
Marine methane hydrates*	Hydrate volume (–)	$\Delta T_{sediment}$	Unidentified [§]	Unclear [¶]	103 to 105 yr (> T_E)	Amplified global warming
Ocean anoxia*	Ocean anoxia (+)	Phosphorus input to ocean	+≈20%	Unclear [¶]	≈104 yr (> T_E)	Marine mass extinction
Arctic ozone*	Column depth (–)	Polar stratospheric cloud formation	195 K	Unclear [¶]	<1 yr (rapid)	Increased UV at surface

N, North; ITCZ, Inter-tropical Convergence Zone; EEP, East Equatorial Pacific; SE, Southeast.

* See SI Appendix 2 for more details about the tipping elements that failed to make the short list.

† Numbers given are preliminary and derive from assessments by the experts at the workshop, aggregation of their opinions at the workshop, and review of the literature.

‡ Global mean temperature change above present (1980–1999) that corresponds to critical value of control, where this can be meaningfully related to global temperature.

§ Meaning theory, model results, or paleo-data suggest the existence of a critical threshold but a numerical value is lacking in the literature.

¶ Meaning either a corresponding global warming range is not established or global warming is not the only or the dominant forcing.

|| Meaning no subcontinental scale critical threshold could be identified, even though a local geographical threshold may exist.

Bijlage 2 Geanalyseerde (beleids)rapporten; overzicht instituten

In hoofdstuk 2 zijn dertien onderzoeks- en beleidsrapporten over klimaatengineering geanalyseerd. Hierna volgt een korte beschrijving van de achtergrond van de instituten en organisaties die deze rapporten hebben uitgebracht, en wordt toegelicht hoe zij het onderwerp in hun rapport benaderen.

Alterra – Policy options to respond to rapid climate change (november 2009)

Alterra maakt deel uit van Wageningen Universiteit & Research centre. Het is een kennisinstituut dat zich gespecialiseerd heeft op het gebied van groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik daarvan. In dit rapport worden nieuwe inzichten op klimaatgebied (sinds het verschijnen van het IPCC-rapport uit 2007) geëvalueerd. Alterra gaat in op de beleidsinstrumenten die ingezet zouden kunnen worden in geval van extreme klimaatscenario's. Klimaatengineering is een van die beleidsopties.

Bipartisan Policy Center (BPC) – Geoengineering. A National strategic plan for research on the potential effectiveness, feasibility and consequences of climate remediation technologies (oktober 2011)

BPC is een Amerikaans instituut dat zowel de belangen van de Republikeinse als van de Democratische partij wil behartigen. Voor het rapport over klimaatengineering is door het instituut een werkgroep samengesteld, de Task Force On Climate Remediation Research. Deze werkgroep adviseert de overheid over onderzoek en beleid op het gebied van klimaatengineering. In het rapport wordt de Amerikaanse overheid aanbevolen om nader onderzoek te doen naar klimaatengineering en vervolgens beleid op te stellen op grond van de resultaten.

Congressional Research Service (CRS) – Geoengineering. Governance and Technology Policy (januari 2011)

CRS ondersteunt de Amerikaanse Senaat door huidig en toekomstig beleid te analyseren. In dit rapport wordt informatie over klimaatengineering vanuit wetenschappelijk en politiek perspectief uiteengezet, als bijdrage aan beleidsvorming. Ook wordt ingegaan op regulering van klimaatengineering.

ETC Group – Geopiracy. The Case Against Geoengineering (oktober 2010)

De ETC Group (Action Group on Erosion, Technology and Concentration) is een wereldwijd opererende ngo die de impact van nieuwe technologieën bewaakt op gebied van biodiversiteit, landbouw en mensenrechten. In het

rapport wordt uiteengezet waarom de ETC Group vindt dat onderzoek naar en toepassing van klimaatengineering niet mag plaatsvinden.

House of Commons – The Regulation of Geoengineering (maart 2010)

In 2009 bracht het Britse Lagerhuis al een rapport uit ter evaluatie van klimaat-engineering, *Engineering, turning ideas into reality*. Het rapport *The Regulation of Geoengineering* bouwt hier op voort. Het gaat in op de implicaties van klimaatengineering voor het Britse beleid.

House of Representatives – Engineering the Climate. Research Needs and Strategies for International Coordination (oktober 2010)

Dit rapport van het Amerikaanse Huis van Afgevaardigden is uitgebracht in samenwerking met en ter aanvulling op het rapport van het Britse Lagerhuis. Het gaat in op onderzoeksmogelijkheden en -strategieën op internationaal niveau.

Kiel Earth Institute (KEI) – Large-Scale Intentional Interventions into the Climate System? Assessing the Climate Engineering Debate (december 2011)

KEI is een adviesorgaan van de Duitse overheid, dat zich concentreert op de sociale en economische consequenties van mondiale veranderingen. Het rapport over klimaatengineering is geschreven in opdracht van het Duitse Ministerie van Onderwijs en Onderzoek. KEI evalueert de verschillende technologieën en geeft een uitgebreide analyse van het debat over klimaatengineering.

RAND Corporation – Governing Geoengineering Research. A Political and Technical Vulnerability Analysis of Potential Near-Term Options (april 2011)

RAND is een van oorsprong Amerikaanse denktank die de overheid wil ondersteunen door het ontwikkelen van oplossingen voor complexe problemen. Het rapport van RAND bestaat uit een risicoanalyse van beleidsstrategieën die op korte termijn relevant zouden kunnen zijn voor de Amerikaanse overheid. Daarbij ligt de focus op SRM. RAND gaat ervan uit dat CDR-technologieën gemakkelijker te overzien zijn, omdat ze op lokale schaal geïmplementeerd zouden worden.

The Royal Society - Geoengineering the Climate. Science, governance and uncertainty (september 2009)

The Royal Society is een Brits genootschap van vooraanstaande wetenschappers. Het rapport is geschreven ter verheldering van de huidige ontwikkelingen rond klimaatengineering. Het geeft een kwalitatieve en deels kwantitatieve evaluatie van een aantal klimaatengineeringstechnologieën. Het rapport is van grote invloed geweest op het internationale debat over klimaatengineering.

Umwelt Bundes Amt – Geoengineering, effective climate protection or megalomania? (april 2011)

Umwelt Bundes Amt is een Duits overheidsorgaan dat de federale overheid adviseert op het gebied van milieu. In het rapport wordt onderzocht of de verschillende technologieën op het gebied van klimaatengineering binnen een duurzaam klimaatbeleid zouden kunnen passen.

United States Government Accountability Office (GAO) – Climate engineering. Technical status, future directions and potential responses (juli 2011)

GAO is een onafhankelijk agentschap dat de federale overheid controleert en het Amerikaanse Congres ondersteunt (Senaat en Huis van Afgevaardigden). De GAO beoogt het Congres van objectieve, op feiten gebaseerde, evenwichtige en onafhankelijke informatie te voorzien. Dit rapport is geschreven op verzoek van het Congres en geeft de technologische rijpheid van de technologieën weer. GAO heeft ook onderzoek gedaan naar de heersende opinie over klimaatengineering onder experts en onder het algemeen publiek.

Woodrow Wilson International Center for Scholars – Geoengineering for decision makers (november 2011)

Het Wilson Center is een kennisinstituut waar prominente wetenschappers vanuit de hele wereld samenkomen. Het instituut probeert het publieke en politieke debat in Amerika te verdiepen door het met evenwichtige en relevante informatie te ondersteunen. In het rapport informeert het Wilson Center beleidsmakers en politici over het onderwerp klimaatengineering. Ook zijn concrete adviezen geformuleerd over verder onderzoek.

Bijlage 3 Diversiteit aan input in rapporten

Tabel 1 Overzicht auteurs en reviewers

Rapport	Auteurs	Reviewers
NAS	T. Lee, P. Brewer, R. Cooper, R. Crandall, R. Evenson, D. Foy, R. Frosch, R. Garwin, J. Glas, K. Lee, G. Marland, J. Mathews, A. Rosenfeld, E. Rubin, M. Russell, S. Schneider, E. Skolnikoff, T. Stix en E. Brown Weiss	x
The Royal Society	J. Shepherd, P. Cox, J. Haigh, D. Keith, B. Launder, G. Mace, G. MacKerron, J. Pyle, S. Rayner, C. Redgwell en A. Watson	D.J. Thomas, D. Fowler, J. Lawton, J. Mitchell, M. Oppenheimer, S. Owens en D. Read
Alterra	R. Swart, N. Marinova, S. Bakker en X. van Tilburg Met input van: T. van der Werff, D. van Vuuren en E. Stehfest	F. Baede, A. Bleijenberg, M. Bles, B. Bregman, H. de Coninck, P. Crutzen, M. Enthoven, E. Ferguson, W. Kersten, J. Lenstra, B. Metz, A. Petersen, A. Robock, S. Schöne, J. van der Sluijs, E. Stehfest, A. van Ulden, D. Victor, D. van Vuuren, T. van der Werff en B. Zoeteman ⁵²
House of Commons	Science & Technology Committee VK	x
ETC Group	Niet duidelijk, redactie door L. Marshy	x
House of Representatives	Science & Technology Committee VS	x
CRS	K. Bracmort, R.K. Lattanzio en E.C. Barbour	x
RAND	R. Lempert en D. Prosnitz	J. Bonomo en J. Blackstock
UBA	Umwelt Bundes Amt DE	x
GAO	P. Anvelt, V. Chanley, N. Chaudhary, F. Childers, N. Donovan, G. Hernandez-Saunders, E. Larson, P. Pickett, A. Spence, G. Wilmoth	D. Riley, L. Espinal, G. Fraser, K. Hunter, A. Janetos, J. Johnson, T. LaPorte, J. Latham, J. Lehmann, M. MacCracken, A. MacDonald, C. St. John, S. Thernstrom, S. Tilmes en O. Toon
BPC	J. Long, S. Rademaker, J.G. Anderson, R.E. Benedick, K. Caldeira, J. Chaisson, David Goldston, S. Hamburg, D. Keith, R. Lehman, F. Loy, G. Morgan, D. Sarewitz, T. Schelling, J. Shepherd, D. Victor, David Whelan, David E. Winickoff	x
WWICS	R. Olson	D. Rejeski, R. Berg, D. Keith, P. Rasch, B. Allenby, G. Hagler en C. Bezold
KEI	W. Rickels, G. Klepper, J. Dovern, G. Betz, N. Brachatzek, S. Cacean, K. Güssow, J. Heintzenberg, S. Hiller, C. Hoose, G. Klepper, T. Leisner, A. Oschlies, U. Platt, A. Proels, O. Renn, S. Schäfer & M. Zürn.	x

52 Slechts één hoofdstuk in dit rapport gaat over klimaatengineering. Het is onduidelijk wie van deze auteurs dit hoofdstuk heeft gereviseerd.

Tabel 2 Overzicht van wetenschappers die persoonlijk informatie hebben geleverd

Rapport	
The Royal Society	Personen: K. Anderson, R. Anderson, T. Barker, P. Boyd, J. Brady, W. Broecker, I. Brunt, H. Bryden, K. Buesseler, M. Campos, M. Capron, A. Carlin, T. Choularton, N. Cowern & C. Ahn, J. Duke, J. Evans, A. Gadian et al., A. Gettelman & S. Tilmes, M. Gorton, S. Bardsley, J. de Lurio, S. Webb, R. Jones, J. Katz, H. Khesghi, R. Lampitt et al., J. Latham et al., T. Lenton & N. Vaughan, E. Lewis-Brown, D. Lunt & P. Valdes, C. McInnes & J. Reese, M. Newell, J. Nissen, T. Palmer, G. Rau, P. Read, D. Reay, R. Remington, A. Robock, J. Roland, S. Salter, R. Samuels, R. Schuiling, J. Severinghaus, D. Sheldrick, M. Sherman, K. Shine et al., D. Skeet, B. Spiegelhalter, R. Taylor, S. Tilmes et al., M. Woodhouse et al. en N. Zeng Organisaties: 2 percent for the Planet, Antarctic Climate & Ecosystems, Atmocean Inc, Biofuelwatch, Carbfix, Climos, CQuestrate, Convention on Biological Diversity, the Engineering Committee on Oceanic Resources, Environment Agency Horizon Scanning Team, Science Department, Environmental Defender's Office, ETC Group, The Grantham Institute for Climate Change, Greenpeace, Heat Island Group, Max Planck Institute for Meteorology, Institute for Research on Environment and Sustainability, The Institute for Physics, Ocean Nourishment Corporation, Plymouth Marine Laboratory, Research Councils, Royal Swedish Academy of Sciences, Science for Humanity Trust, Scripps Institution of Oceanography, UK Biochar Research Centre en UK Met Office
House of Commons	M. van Aalst, J. Blackstock, A. Corner, ETC Group, D. Keith, D. King, J. Lee, D. MacKay, T. Kruger, N. Pidgeon, J. Ruddock, The Royal Society en J. Virgoe
House of Representatives	S. Barrett, K. Caldeira, J. Fleming, R. Jackson, D. Keith, L. Lane, K. Lackner, J. Long, G. Morgan, J. Shepherd, P. Rasch, A. Robock en F. Rusco
GAO	S. Barrett, G. Benford, K. Caldeira, P. Crutzen, S. Doney, H. Ducklow, F. Dyson, D. Fahey, C. Garten, J. Gibbons, J. Hack, R. Keeling, D. Keith, K. Lackner, J. Latham, R. Lindzen, J. Long, M. MacCracken, A. MacDonald, G. Marland, J. Melillo, G. Morgan, E. Parson, P. Rasch, A. Ravishankara, A. Robock, L. Rothstein, S. Schneider, J. Shepherd, R. Socolow, R. Somerville, S. Strand, S. Tilmes en J. Tombari

Tabel 3 Literatuur waaraan door ten minste vijf rapporten is gerefereerd**Meest gerefereerde onderzoeken**

- Akbari, H., S. Menon & A. Rosenfeld (2009). 'Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO₂'. In: *Climatic Change* 94, pp. 275-286.
- Albrecht, B.A. (1989). 'Aerosols, cloud physics and fractional cloudiness'. In: *Science* 245, pp. 1227-1230.
- Angel, R. (2006). 'Feasibility of cooling the Earth with a cloud of small spacecraft near the inner Lagrange point (L1)'. In: *Proceedings of the National Academy of Science* 103, pp. 17184-17189.
- Barrett, S. (2008). 'The incredible economics of geoengineering'. In: *Environmental and Resource Economics* 39, pp. 45-54.
- Blackstock, J.J., D.S. Battisti, K. Caldeira, D.M. Eardley, J. I. Katz, D.W. Keith, A. Patrinos, D.P. Schrag, R. H. Socolow & S.E. Koonin (2009). *Climate engineering Responses to Climate Emergencies*. Novim, available at: <http://arxiv.org/pdf/0907.5140>.
- Crutzen, P.J. (2006). 'Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma?' In: *Climatic Change* 77, pp. 211-220.
- Early, J.T. (1989). 'Space based solar shield to offset greenhouse effect'. In: *Journal of the British Interplanetary Society* 42, pp. 567-569.
- Govindasamy, B. & K. Caldeira (2000). 'Geoengineering Earth's Radiation Balance to Mitigate CO₂-induced Climate Change'. In: *Geophysical Research Letters* 27, pp. 141-144.
- Keith, D.W. (2000). 'Geoengineering the climate. History and Prospect'. In: *Annual Review of Energy and the Environment* 25, pp. 245-284.
- Keith, D.W., E. Parson & M.G. Morgan (2010). 'Research on global sun block needed now'. In: *Nature* 463, pp. 426-427.
- Latham, J., P. Rasch, C.C. Chen, L. Kettles, A. Gadian, A. Gettelman, H. Morrison, K. Bower & T. Choulaton (2008). 'Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds'. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society* 366, pp. 3969-3987.
- Lehmann, J., J. Gaunt & M. Rondon (2006). 'Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems. A review'. In: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11, pp. 403-427.
- Lenton, T.M. & N.E. Vaughan (2009). 'The Radiative forcing potential of different climate geoengineering options'. In: *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 9, pp. 2559-2608.
- Ridgwell, A., J.S. Singarayer, A. Hetherington & P.A. Valdes (2009). 'Tackling regional climate change by leaf albedo bio-geoengineering'. In: *Current biology* 19, pp. 146-150.
- Robock, A. (2008). '20 reasons why geoengineering might be a bad idea'. In: *Bulletin of the Atomic Scientists* 64, pp. 14-18.
- Royal Society, The (2009). *Geoengineering the Climate. Science Governance and Uncertainty*. London: The Royal Society.
- Schilling, R.D. & P. Krijgsman (2006). 'Enhanced weathering: an effective and cheap tool to sequester CO₂'. In: *Climatic Change* 74, pp. 349-354.
- Teller, E., L. Wood & R. Hyde (1997). *Global Warming and Ice Ages: I. Prospects for Physics-Based Modulation of Global Change*. Lawrence Livermore National Laboratory.
- Trenberth, K.E. & A. Dai (2007). 'Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering'. In: *Geophysical Research Letters* 34. doi:10.1029/2007GL030524.
- Victor, D., M.G. Morgan, J. Apt, J. Steinbruner & K. Ricke (2009, April). 'The Geoengineering Option. A Last Resort Against Global Warming?' In: *Foreign Affairs*.

Bijlage 4 Zoektermen voor klimaatengineering in het Web of Science

Geoengineering

- Algemeen: ts=geoengin* or so=geoengin* or ts="climate engineering" or ts="climate remediation" or ts="climate intervention" or ts="climate modification" or ts="earth system* engineering" or ts="planetary engineering"

Carbon Dioxide Removal

- BECS: ts=bio-energy carbon storage or ts=BECS
- Ocean iron fertilisation: ts="ocean* fertili?ation" or ts="ocean* iron fertili?ation" or ts="ocean liming"
- Biochar: ts=biochar or ts="terra preta" and ts=sequestr*, waarbij de toevoeging van sequestration is bedoeld om alternatieve toepassingen van biochar (zoals voor het verhogen van de productiviteit van landbouwgrond) uit te sluiten
- Direct air capture en Storage of carbon: Het resultaat is een benadering van het onderzoek dat geen betrekking heeft op carbon capture & storage, omdat het onderscheid tussen CCS en direct air capture moeilijk is te maken
 - Direct air capture: ts="direct air capture" or (ts="air capture" and (ts=scrubbing or ts=sorbent material*)) or ((ts=urea or ts=ammonium sulphate or ts=lime) and (ts=neutrali?ation and (ts=carbon or ts=CO₂)))
 - Storage of carbon: ts=inject* supercritical co2 and (ts=sequestration or ts=storage)

Solar Radiation Management

- Space sunshades and space mirrors: ts="space mirror*" or ts=space sunshade or ts="space reflector*" or ts="space-based geoengineering" or ts="sunshade geoengineering" or ts="space-based reflector"
- Stratospheric sulphur aerosols and Stratospheric Particle Injection: ts=stratospher* particle* injection* or ts=stratospher* aerosol* injection*
- Enhancing cloud reflectivity, albedo enhancement of marine stratocumulus and stratiform clouds: ts=cloud reflectivity enhanc* or ts=albedo enhanc* marine cloud* or ts="marine cloud brightening"
- Enhancing land albedo: ts="increas* albedo" land or ts=cropland reflectivity or ts="cool roof*" or ts="reflective roof*"; andere zoektermen leverden niets op, hetzij omdat ze geen publicaties opleverden (increasing albedo in combinatie met desert, human settlement, cropland en grassland) hetzij

omdat de meeste gevonden publicaties regulier klimaatonderzoek betreffen (zoals vegetation albedo modification)

De papers gepresenteerd tijdens de *1st International Conference on Geotechnical Geoenvironmental Engineering and Management in Arid Lands Geo 2000* zijn uit de dataset weggelaten, omdat ze geen betrekking hebben op geoengineering.

Bijlage 5 Overzicht geïnterviewde stakeholders

Hein de Baar is hoogleraar oceanografie aan de Rijksuniversiteit Groningen en werkzaam bij het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee. De Baar is opgeleid als chemisch ingenieur aan de Technische Universiteit Delft.

Joost Barendrecht was ten tijde van het interview commercieel directeur bij Grontmij Geogroep. Tegenwoordig is hij zelfstandig adviseur bij Joost Barendrecht Duurzaam Advies.

Mart Bles is onderzoeker bij CE Delft. CE Delft is een onafhankelijk onderzoeks- en adviesbureau, gespecialiseerd in het ontwikkelen van innovatieve oplossingen van milieuvraagstukken (CE staat voor Committed to the Environment.) In 2009 deed Bles voor zijn masterthese onderzoek naar klimaat-engineering bij CE Delft.

Marcel Crok is freelance wetenschapsjournalist. Hij is afgestudeerd chemicus en staat bekend als klimaatscepticus. Hij is een van de reviewers van het laatste IPCC-rapport.

Wijnand Duyvendak was van 2002 tot 2007 Tweede Kamerlid voor GroenLinks. Tegenwoordig is hij directeur van Triple Turnaround, een project- en adviesbureau voor maatschappelijke initiatieven. Duyvendak is publicist over groene politiek en de opwarming van de aarde.

Gert de Gans is programmaspecialist Klimaat bij ICCO. Deze ontwikkelingsorganisatie wil bijdragen aan armoedebestrijding door het bevorderen van zelfredzaamheid.

Pol Knops is natuurkundige en mede-eigenaar van Innovation Concepts B.V., een tweemansbedrijf in duurzame ontwikkelingen (producten, processen en concepten voor het vastleggen van CO₂).

Paul Oude Boerrigter is senior onderzoeker bodem bij Grontmij, een advies- en ingenieursbureau met expertise op onder meer de gebieden energie, duurzame gebouwen en water.

Frans Rooijers is directeur van CE Delft. CE Delft is een onafhankelijk onderzoeks- en adviesbureau, gespecialiseerd in het ontwikkelen van innovatieve oplossingen van milieuvraagstukken (CE staat voor Committed to the Environment).

Rolf Schipper is campagneleider klimaat en energie van Greenpeace Nederland.

Sible Schöne is programmadirecteur van Klimaatbureau HIER, een initiatief van meer dan dertig maatschappelijke organisaties die heel Nederland willen betrekken bij de oplossing van het klimaatprobleem. Daarnaast is Schöne voorzitter van de Bezinningsgroep Energie, voorzitter van het Centraal College van Deskundigen van de CO₂-Prestatieladder en programmadirecteur van de Stichting Klimaatvriendelijk Aanbesteden en Ondernemen (SKAO).

R.D. (Olaf) Schuiling is geoloog en petroloog. Van 1972 tot 1997 was hij hoogleraar geochemie aan de Universiteit Utrecht, daarnaast bekleedde hij tal van nevenfuncties. Schuiling is een pionier op het gebied van de verwerking van het mineraal olivijn. In 2009 richtte hij de Stichting Olivijn op.

Henk Simons is als senior adviseur biodiversiteit werkzaam bij de International Union for the Conservation of Nature (IUCN). De IUCN is de grootste wereldwijde organisatie op het gebied van natuurbescherming en zet zich in om het behoud en duurzaam gebruik van natuurlijke hulpbronnen te bevorderen. Hierbij vormt het een platform voor Nederlandse ngo's en ondersteunt het ngo's in ontwikkelingslanden.

Appy Sluijs is universitair docent paleoklimatologie aan de Universiteit Utrecht. Hij doet onderzoek naar klimaatveranderingen in het geologisch verleden en naar de relatie tussen CO₂ en het klimaat op aarde. Sluijs is lid van De Jonge Akademie van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen. In 2007 werd hij onderscheiden met de Outstanding Young Scientists Award van de European Geosciences Union (EGU).

Jan-Berend Stuut doet onderzoek naar woestijnstof in oceanen. Stuut staat bekend als dé Nederlandse stofonderzoeker. Hij is als senior onderzoeker verbonden aan de afdeling mariene geologie van het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee op Texel. In juli 2012 honoreerde NWO zijn onderzoeksvorstel TRAFFIC: Transatlantic fluxes of Saharan dust and ocean-climate impacts.

Pier Vellinga is hoogleraar klimaatverandering aan WageningenUR (Alterra) en aan de Vrije Universiteit. Daarnaast bekleedt hij functies in de raden van bestuur van onder andere Kennis voor Klimaat, Klimaat voor Ruimte en het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee. Ook heeft hij een belangrijke rol gespeeld in het opzetten en begeleiden van het IPCC. In 2011 verscheen zijn populairwetenschappelijke boek *Hoezo klimaatverandering. Feiten, fabels en open vragen*, waarin hij inzicht geeft in het broeikaseffect.

Detlef van Vuuren werkt als senior onderzoeker op het Planbureau voor de Leefomgeving, sector Klimaat, Lucht en Energie. Hij houdt zich bezig met het modelleren van globale veranderingen in samenhang tot het klimaat. Sinds 2011 is hij ook bijzonder hoogleraar 'Integrated Assessment of Global Change' aan het Utrecht Sustainability Institute (Universiteit Utrecht). Door te kijken naar langetermijnsscenario's onderzoekt hij globale veranderingen en oplossingsrichtingen voor deze veranderingen. Zijn focus hierbij ligt op energie- en mitigatiesystemen.

Ron Wit, milieu-econoom, is sinds december 2013 directeur Public Affairs van energiebedrijf Eneco. Op het moment dat het interview voor dit rapport plaatsvond, was hij nog werkzaam als hoofd Klimaat en Energie bij de Stichting Natuur & Milieu. De drie hoofdthema's van Natuur & Milieu zijn energie, voedsel en mobiliteit.

Bijlage 6 Verslag expertmeeting 'De governance van klimaat- engineering'

Cathalijne Boland

'Praten over governance maakt het vraagstuk niet noodzakelijk kleiner'

Ingrijpende technologieën die grootschalig worden ingezet om klimaatverandering tegen te gaan. Wat is er nodig voor een verantwoord beleid? Vier experts geven hun visie op de governance van klimaatengineering. 'Ik denk eerder aan randvoorwaarden, dan aan een verbod of moratorium.'

Europa heeft zichzelf opgeworpen tot leider in de strijd tegen klimaatverandering. Het Rathenau Instituut verwacht daarom binnen afzienbare tijd discussie over een mogelijk Europees onderzoeksprogramma op gebied van klimaatengineering. Klimaatengineering, ook wel geo-engineering, is het doelbewust en grootschalig ingrijpen in het klimaatsysteem op aarde, om op die manier de door de mens veroorzaakte klimaatverandering tegen te gaan.

Na een analyse van de ethische en juridische literatuur heeft het Rathenau Instituut uitgangspunten geformuleerd waaraan onderzoek naar, en toepassing van klimaatengineering zou moeten voldoen. Ook de reeds bestaande internationale milieuverdragen zijn hierin meegenomen. Uit de analyse blijkt dat grootschalige *toepassing* van klimaatengineering op dit moment ontoelaatbaar is. Maar hoe zit het dan met het *onderzoek* naar deze nieuwe technologieën: is dat wél wenselijk? En zo ja, onder welke voorwaarden dan? Wat zou je moeten regelen om onderzoek naar klimaatengineering, en de eventuele latere toepassing ervan, in goede banen te leiden?

In een expertmeeting op het Rathenau Instituut geven vier externe deskundigen hun visie op dit governance-vraagstuk. Gareth Davies is hoogleraar Europees recht aan de VU. Het onderwerp klimaatengineering kwam toevallig op zijn pad en sindsdien is hij het blijven volgen. Jip Lenstra, tegenwoordig partner bij Ecorys, verdiepte zich in zijn vorige werk voor onderzoekadviesbureau ECN uitgebreid in verschillende technologieën op gebied van klimaatengineering. Jesse Reynolds schrijft een proefschrift aan de Tilburg Law School over de internationale regulering van onderzoek naar klimaatengineering.

Arthur Petersen is als 'chief scientist' verantwoordelijk voor de kwaliteit van het onderzoek door het Planbureau voor de Leefomgeving, en daarnaast bijzonder hoogleraar wetenschap en milieubeleid aan de VU.

De discussie wordt geleid door Frans Brom, hoofd van de afdeling Technology Assessment van het Rathenau Instituut. Verder zijn namens het Rathenau Instituut aanwezig Rinie van Est (themacoördinator) en Monique Riphagen (onderzoeker).

Morele voorwaarden: gepasseerd station

In de discussienota voor deze expertmeeting zijn de morele en juridische uitgangspunten op een rijtje gezet: het zijn er in totaal veertien. Gareth Davies moet hierover direct iets van het hart: 'Bij geo-engineering ligt de nadruk altijd zo op de morele voorwaarden voor onderzoek. Dat vind ik eigenlijk ongepast.' Je kunt als beleidsmaker wel een voorkeur hebben voor mitigatie (het verminderen van de CO₂-uitstoot door gedragsverandering), maar je moet wel realistisch blijven, vindt hij. 'Als beleidsmaker moet je je afvragen: is het waarschijnlijk dat de wereld voldoende zal mitigeren om een ernstige klimaatverandering te voorkomen? Als het antwoord nee is, dan moet je zo snel mogelijk voluit inzetten op geo-engineering.' Al te lang stil staan bij de morele juistheid van dat onderzoek zou volgens Davies dan eerder een vorm van 'vermijdings-gedrag' zijn.

Ook Jesse Reynolds wijst op het gevaar van een te hoge morele standaard voor onderzoek naar geo-engineering. 'Zoals de uitgangspunten nu geformuleerd zijn, zou klimaatengineering aan een standaard moeten voldoen waar geen enkele andere technologie in die mate aan gehouden wordt.' Het *no harm*-principe geldt bijvoorbeeld ook voor de geneeskunde. 'Toch voeren artsen in noodgevallen amputaties uit zonder verdoving. En wat denk je van een chemokuur? Dat is puur vergif.'

Volgens Arthur Petersen zal de vraag of onderzoek naar klimaatengineering überhaupt moreel te rechtvaardigen is, binnenkort door de werkelijkheid worden ingehaald, voor zover dat niet al gebeurd is. In het internationale klimaatdiscours wordt namelijk nog steeds vastgehouden aan het doel om de opwarming van de aarde tot maximaal twee graden te beperken. Petersen legt uit hoe in al die twee graden-scenario's standaard wordt uitgegaan van 'negatieve emissies', te bereiken door een gecombineerde inzet op bio-energie en CCS (Carbon Capture and Storage).

Petersen: 'Iedereen neemt dat in die scenario's maar van elkaar over, zonder een geloofwaardig verhaal hoe dat op zo'n grote schaal zou kunnen werken. Dat is de wetenschapssociologie van het klimaatprobleem.' De vraag of er nog andere opties zijn om het twee graden-doel te bereiken, zal zich dus volgens

Peters snel genoeg aandienen. 'Als je daaraan vast wilt houden, is er bijna geen scenario denkbaar zonder geo-engineering.'

Het 'moral hazard'-argument

De discussie over morele voorwaarden concentreert zich al snel op het *moral hazard*-dilemma: een vals gevoel van veiligheid dat tot risicovol gedrag leidt. Het (onterechte) gevoel dat een puur technologische oplossing voorhanden is, kan ertoe leiden dat mensen geen noodzaak meer zien voor gedragsverandering. Vanuit dit valse gevoel van veiligheid zou men zelfs kunnen denken dat er nog ruimte is voor een 'extra ronde' aan economische groei, met gebruik van fossiele brandstoffen.

Wat Gareth Davies betreft is het moral hazard-argument geen reden om af te zien van onderzoek naar klimaatengineering. Ook zonder het uitzicht op een technologische oplossing blijven mensen immers al consumeren en energie verbruiken alsof het wel losloopt met de klimaatverandering. 'Dat gedrag zal misschien pas veranderen als mensen de gevolgen van een ernstige klimaatverandering zelf in hun dagelijks leven ondervinden.'

Jesse Reynolds maakt een vergelijking met autogordels. Wie een gordel draagt, neemt meer risico op de weg dan wie zonder gordel achter het stuur zit. En toch is het nettoresultaat van de verplichte autogordel dat autorijden tot minder slachtoffers leidt. Hetzelfde gaat op voor klimaatengineering. Misschien leidt moral hazard tot een hoger verbruik van fossiele energie, maar is het netto-effect dat er minder CO₂ in de atmosfeer zit. En daar gaat het tenslotte om.

Of niet? Jip Lenstra waarschuwt alvast voor de reactie van de milieubeweging: die zal daar zeker anders over denken. Hij merkte dat in de discussie over CCS. De milieubeweging was daartegen. Volgens Lenstra vanuit het calvinistische wereldbeeld waarin een oplossing die 'te makkelijk' is, wel moreel onjuist moet zijn. Met name Greenpeace maakte in deze discussie gebruik van het moral hazard-argument: 'CCS werd duidelijk geframed als een alternatief voor groene energie, en zou dus ook financiële middelen wegnemen die anders voor de ontwikkeling van groene energie zouden worden ingezet. Dat zou de druk van de ketel halen om iets aan de vervanging van fossiele brandstoffen te doen.' Lenstra denkt dat het argument voor de milieubeweging in de discussie over klimaatengineering nog zwaarder zal wegen dan in de discussie over CCS.

Arthur Petersen lijkt de enige externe expert aan tafel die moral hazard wel als een reëel risico ziet, waar beleidsmakers rekening mee moeten houden in hun beleid. 'Je ziet het nu gebeuren in de reactie op schaliegas: het wordt als een kans aangegrepen om iets minder snel te hoeven mitigeren. We zullen duidelijk moeten maken dat klimaatengineering geen valide excuus is om nu mitigatie- en adaptatiemaatregelen uit te stellen. Dat gaat niet vanzelf goed.'

'Toolkit' voor de manager

Voor het vervolg van de discussie is het goed om te weten dat er binnen klimaatengineering twee clusters aan technologieën bestaan: Carbon Dioxide Removal (CDR) en Solar Radiation Management (SRM). Bij CDR gaat het om technologieën om CO₂ uit de atmosfeer te halen en vervolgens op te slaan. Bij SRM gaat het om technologieën die zonlicht weren, waardoor de aarde afkoelt. SRM doet niets aan de hoeveelheid CO₂ die al in de atmosfeer zit, maar zorgt wel voor onmiddellijke afkoeling. SRM is ingrijpend en wordt daarom vooral gezien als uiterste middel voor het geval er een acute klimaatramp dreigt.

Jip Lenstra vindt het belangrijk om het klimaatprobleem op de goede manier te 'framen', voordat de juiste oplossing aan de orde komt. Toen hij zich voor het eerst in klimaatengineering verdiepte, ging hij ervan uit dat klimaatrampen en *tipping points* zich al rond 2050 zouden aandienen, en dat je dus snelle, SRM-achtige technologieën nodig zou hebben om dat tegen te gaan. Maar toen hij de wetenschappelijke literatuur erop nasloeg, kwam hij tot de conclusie dat de klimaatverandering zich in een kalmer tempo zal voltrekken. Het lijkt hem nu onwaarschijnlijk dat er zich voor het eind van deze eeuw een klimaatramp zal aandienen die je met SRM zou willen oplossen. 'Je hoeft geen Einstein te zijn om te beseffen dat we het klimaatprobleem niet in de klauwen hebben als we het alleen met mitigatie en adaptatie moeten doen, maar we hebben meer tijd dan de alarmisten in het milieudebat ons willen doen geloven.'

Die tijd moeten we gebruiken om aan oplossingen te werken, aan een *toolkit* voor de managers van het klimaatprobleem. Wat Lenstra betreft zit daarin: mitigatie, adaptatie, CDR én SRM. 'Mijn advies zou zijn om flink te investeren in CDR, want daarmee kun je het klimaatprobleem op den duur echt oplossen. Maar ook SRM hoort in de toolbox: voor uiterste nood, als er dingen gebeuren die de wetenschap niet verwacht.'

Voorrang in onderzoeksbeleid voor CDR of SRM?

De inrichting van de toolbox roept discussie op over de vraag of je een van beide technologieclusters, CDR of SRM, voorrang zou moeten geven in onderzoeksbeleid. Dat is immers óók een governance-vraagstuk.

Gareth Davies is mordicus tegen welke sturing van onderzoek dan ook door de overheid. Hij is voor 'blue sky thinking': zo vrij mogelijk wetenschappelijk onderzoek, omdat je nu eenmaal niet kunt voorspellen welke technologie tot een doorbraak in de aanpak van het klimaatprobleem zal leiden. 'Misschien is SRM niet meer dan symptoombestrijding, maar wél heel makkelijk te ontwikkelen. Het is niet onvoorstelbaar dat de efficiëntste aanpak uiteindelijk blijkt te zijn: SRM in combinatie met andere technologieën.'

Arthur Petersen is dat niet met hem eens: onderzoeksgeld is nu eenmaal beperkt beschikbaar, en dus moet je prioriteiten stellen. Onderzoek naar

CDR-technologieën heeft dan zijn voorkeur, omdat SRM inderdaad nooit meer dan symptoombestrijding kan zijn. Zoals gezegd: het houdt zonnestraling tegen, maar haalt geen CO₂ uit de atmosfeer. En dat doet CDR wel.

Jip Lenstra vertelt over de vele verrassende nieuwe ideeën die hij is tegengekomen sinds hij zich met CDR bezighoudt. Nog maar kort geleden las hij weer zoiets: iemand had bedacht om 's winters gaten door het zeeijs op de Noordpool te boren (slechts vier meter dik), hier zeewater door op te pompen en dit over de Noordpool uit te laten stromen. Dat zeewater vriest dan natuurlijk aan en *voilà*, de Noordpool heeft een dikkere ijsjas om de zomers mee door te komen, zonder verder af te smelten. 'Dat scheelt nogal in je Radiation Management.'

Spontaan ontstaat er een rondje 'blue sky thinking' over dit plan ('dit opent ook perspectieven voor de Nederlandse baggerindustrie'), tot de heren zichzelf tot de orde roepen: 'Ah, we zijn jongetjes nu.'

Het geeft wel aan hoe hoopvol nadenken over CDR kan stemmen. Maar uitgerend Gareth Davies, degene die *carte blanche* wil voor elk onderzoek dat het klimaatprobleem kan helpen oplossen, tempert het enthousiasme: 'Ik heb nog niet één CDR-voorstel gezien waaruit blijkt dat het een bijdrage zou kunnen leveren. Het is allemaal hartstikke leuk, maar CDR kost heel veel geld voor relatief weinig impact.'

Lenstra vindt dat je dat niet zomaar kunt zeggen: 'Wat vinden wij duur voor CDR: honderd euro per ton, of vijftig, of tweehonderd? Ik weet het niet. Als de wereld vergaat, is het allemaal niet duur. Vergis je niet: zonnecellen kosten ook vijfhonderd euro per ton. En een zuinige auto moet ook fiscaal met vijfhonderd euro per ton gestimuleerd worden.' Omdat CDR daarmee in de bandbreedtes voor mitigatiekosten zit, vindt hij dat onderzoek ernaar ook wat de kosten betreft gerechtvaardigd is. 'Je kunt CDR niet afschrijven als "traag en duur", voordat je hebt onderzocht of het goedkoper en grootschaliger kan worden toegepast.'

De governance van onderzoek: CDR via bestaande verdragen

De experts zijn het er dus over eens dat onderzoek naar klimaatengineering onvermijdelijk is, ondanks eventuele morele bezwaren daartegen zoals het moral hazard-argument. Hoe zit het vervolgens met de governance: moet er iets geregeld worden om onderzoek volgens vooraf bepaalde ethische en juridische normen te laten verlopen?

Gareth Davies gaat ervan uit dat alles zichzelf wel zal regelen. Hij redeneert vanuit praktische toepassing: regulering kan wat hem betreft wachten tot er zich een technologie heeft aangediend die daadwerkelijk klaar is voor grootschalig gebruik. 'Zolang het om een zuiver hypothetische discussie gaat, zal

geen enkel machtig land geïnteresseerd zijn in de oprichting van een organisatie voor de governance van klimaatengineering.’

Petersen denkt bij het governance-vraagstuk vooral aan het aanpassen van bestaande verdragen: ‘Als we vasthouden aan de twee graden-norm, en als geo-engineering daarin een plek krijgt, zal een deel van de governance gaan plaatsvinden in het kader van het Raamverdrag klimaatverandering. En vandaaruit moet je dan meteen verbindingen leggen naar het Biodiversiteitsverdrag.’

Volgens Jip Lenstra is in het kader van het Biodiversiteitsverdrag geprobeerd om onderzoek naar klimaatengineering te blokkeren door het verdrag op dit onderwerp ‘dicht te timmeren’. Dat wil hij uiteraard voorkomen, en Petersen ook: ‘Veel CDR-onderzoek zal zich op de oceanen afspelen, waarover je allerlei dingen zult moeten afspreken. Maar daarbij gaat het meer om de randvoorwaarden voor onderzoek, dan om een verbod of moratorium. Daar geloof ik niet in.’

Jesse Reynolds pleit ervoor om de discussie over governance voorlopig te beperken tot de onderwerpen die zich nu al aandienen: het vaststellen van onderzoeksnormen (zoals transparantie), en het reguleren van intellectueel eigendomsrecht van SRM-technologieën.

Zijn advies: ga bij de regulering van deze urgente, maar niet per se ingewikkelde vraagstukken uit van reeds geformuleerde beginselen voor onderzoek naar klimaatengineering, zoals de Oxford- en Asilomar-principes. ‘Daar zit al de nodige overlap in, en het maakt de kans op internationale overeenstemming groter dan wanneer je meteen rampscenario’s aan de orde wilt stellen. Grootschalige toepassing van SRM is nog lang niet aan de orde.’

De governance van toepassing: SRM via de Veiligheidsraad?

Als het onderzoek naar CDR zich volgens de experts min of meer vanzelf zal reguleren in het kader van bestaande milieuverdragen, hoe zit het dan met SRM?

SRM moet in de toolkit voor het geval er zich een acute noodsituatie voordoet op gebied van klimaatverandering, daar zijn de experts het over eens. Moet er dan iets geregeld worden om een verantwoorde toepassing van SRM te kunnen garanderen? Hoe zou je bijvoorbeeld kunnen verhinderen dat een land eenzijdig tot de inzet van een grensoverschrijdende SRM-technologie overgaat?

Jip Lenstra heeft ‘cynische gedachten’ over het agenderen van dit governance-vraagstuk. ‘Erover praten maakt het vraagstuk niet noodzakelijk kleiner,’ zeg hij. Wie op dit moment al over toepassing van SRM begint, komt volgens Lenstra

tot de conclusie dat de United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) daar een beslissing over zou moeten nemen. 'Dat is een traject dat tien jaar duurt.' Doe je daarentegen niks, zo redeneert Lenstra, dan zou de Veiligheidsraad een beslissing nemen als er zich een noodsituatie voordoet op klimaatgebied. De Veiligheidsraad is immers onze 'brandweer' voor mondiale problemen. 'De Veiligheidsraad is het snelste en hoogste orgaan dat er is, en adequater dan dat kunnen we het toch niet organiseren.'

Arthur Petersen is er iets minder gerust op om de beslissing over de inzet van SRM bij acute klimaatproblemen aan de Veiligheidsraad over te laten. Hij kan zich voorstellen dat er toch een ander internationaal orgaan nodig zou kunnen zijn voor vraagstukken rond klimaatengineering. Een land als China kan bijvoorbeeld binnen de eigen landsgrenzen al vrij ingrijpende technologieën toepassen, waarvan de effecten grensoverschrijdend kunnen zijn. Toch denkt hij dat op dit moment een gevoel van urgentie ontbreekt om de oprichting van een soort International Atomic Energy Agency op gebied van klimaatengineering voor elkaar te krijgen.

Zijn vergelijking met de IAEA lijkt even tot de verbeelding te spreken onder de aanwezigen. De IAEA is van 1957 en werd dus pas opgericht toen het al te laat was, want de bommen op Hiroshima en Nagasaki waren al gevallen. Als klimaatengineering ook zo'n verwoestend effect zou kunnen hebben, zou je dat met regulering vóór willen zijn. Want wie weet welke technologieën er nog bedacht worden, en hoe verwoestend die in verkeerde handen zouden kunnen uitpakken.

Jip Lenstra verwerpt dit doembeeld niet direct, maar houdt het dan toch bij de SRM-technologieën die hij al kent. En de gevolgen van het gebruik daarvan zijn wat hem betreft niet van dien aard dat ze om de oprichting van een 'International SRM Agency' zouden vragen.

Gareth Davies wil de discussie beperken tot het concreet haalbare: 'De vraag wat je wilt, moet altijd gekoppeld zijn aan de vraag wat realistisch is. Als het niet realistisch is, hoef je het ook niet te willen. Ik sluit niet uit dat Europese landen wel willen samenwerken, in een Europese Climate Agency of iets dergelijks. Maar of de VS, Rusland en China dat ook willen, een governance-structuur met enige m^acht, dat vraag ik me af. Zo'n organisatie komt er gewoon niet. Dus moeten wij ons afvragen hoe wij als autonome landen onze weg vinden in een wereld waarin zo'n organisatie niet bestaat.'

De expertmeeting vond plaats op 17 september 2013 in het Rathenau Instituut

Wie was Rathenau?

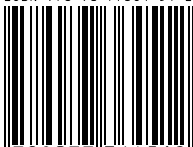
Het Rathenau Instituut is genoemd naar professor dr. G.W. Rathenau (1911-1989). Rathenau was achtereenvolgens hoogleraar experimentele natuurkunde in Amsterdam, directeur van het natuurkundig laboratorium van Philips in Eindhoven en lid van de Wetenschappelijke Raad voor het Regeringsbeleid. Hij kreeg landelijke bekendheid als voorzitter van de commissie die in 1978 de maatschappelijke gevolgen van de opkomst van micro-elektronica moest onderzoeken. Een van de aanbevelingen in het rapport was de wens te komen tot een systematische bestuurdering van de maatschappelijke betekenis van technologie. De activiteiten van Rathenau hebben ertoe bijgedragen dat in 1986 de Nederlandse Organisatie voor Technologisch Aspectenonderzoek (NOTA) werd opgericht. NOTA is op 2 juni 1994 omgedoopt in Rathenau Instituut.

Klimaatengineering: hype, hoop of wanhoop?

Klimaatengineering, ook wel geo-engineering genoemd, is het bewust en groot-schalig ingrijpen in het klimaatstelsel om klimaatverandering tegen te gaan. Dit kan door technologieën in te zetten die zonlicht weerkaatsen of CO₂ vastleggen. Denk hierbij aan het witter maken van wolken boven zee, of aan het uit de lucht filteren en ondergronds opslaan van CO₂. Het wordt steeds waarschijnlijker dat we dit soort technologieën nodig hebben om de opwarming van de aarde tot twee graden Celsius te beperken. Echter, elke technologie biedt kansen, maar ook risico's. De precieze effecten op het klimaatstelsel zullen zich namelijk pas bij grootschalige toepassing openbaren. Welke technologieën kunnen en moeten we inzetten en tegen welke prijs?

Met dit rapport wil het Rathenau Instituut een impuls geven aan het politieke en maatschappelijke debat over klimaatengineering in Nederland. Onze conclusie is dat klimaatengineering op korte termijn geen perspectief biedt om de klimaatverandering binnen aanvaardbare grenzen te houden. Wel kunnen de verschillende technologieën om CO₂ uit de lucht te halen en op te slaan hier op termijn een bijdrage aan leveren. Het verminderen van de uitstoot van broeikasgassen blijft echter de belangrijkste beleidsopgave.

ISBN 978-90-77364-51-2



9 789077 364512 >