



DE GROENE
REKENKAMER

EEN GEVOELIGE KWESTIE

Hoe het IPCC goed nieuws over
klimaatverandering verborg

Nicholas Lewis en Marcel Crok

Stichting De Groene Rekenkamer

Objectief en neutraal

Objectiviteit en neutraliteit behoren vanzelfsprekend te zijn bij lastige beleidskwesties. Cijfermatige controle van resultaten, vrij van emotie en een vooringenomen standpunt is de enige manier om een doeltreffend beleid te kunnen vormen.

De Groene Rekenkamer voert deze controle uit, op eigen initiatief of op verzoek, en vrij van politieke voorkeur en absoluut onafhankelijk van wie dan ook. De Groene Rekenkamer stelt zich strikt neutraal op bij verzoeken om cijfermatige controle. In elke overeenkomst met een opdrachtgever staat daarom dat deze geen invloed heeft op de uitkomsten.

Dit is de kracht van de Groene Rekenkamer.

Artikel 1 van de Statuten zegt immers:

Het doel van de stichting is het kritisch volgen van het overheidsbeleid op het gebied van milieu, gezondheid, technologie en verwante gebieden en te bevorderen dat dit wordt gebaseerd op wetenschappelijke analyses van risico's en kosteneffectiviteit van maatregelen.

Dit rapport is een vertaling van het rapport "A Sensitive Matter - How the IPCC Buried Evidence Showing Good News About Global Warming", dat is uitgegeven door de Global Warming Policy Foundation. Er bestaat ook een kortere Engelse versie van het rapport getiteld "Oversensitive - How The IPCC Hid The Good News On Global Warming". Beide rapporten zijn gratis te downloaden op de website van de Global Warming Policy Foundation, <http://www.thegwpcf.org/category/gwpcf-reports/> en van de website van de Groene Rekenkamer, <http://www.groenerekenkamer.nl/rapporten/>

Het rapport is vertaald door Marcel Crok en is eveneens via bovenstaande link te downloaden.

EEN GEVOELIGE KWESTIE

Hoe het IPCC goed nieuws over klimaatverandering verborg

Nicholas Lewis en Marcel Crok

Voorwoord door Professor Judith Curry

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Over de auteurs	5
Samenvatting	7
Introductie	11
Onverwachte beslissing in AR5	13
De geschiedenis van klimaatgevoeligheid	15
Observaties duiden op een lage klimaatgevoeligheid	17
De bewijzen voor een lage klimaatgevoeligheid stapelen zich op	27
Zwakke studies vertroebelen het zicht	32
Instrumentele schattingen zijn superieur	39
Modellen overschatten de opwarming	44
Overgangsklimaatgevoeligheid in AR5	47
Wat zal de toekomst brengen?	51
Conclusies	55
Appendix	58
Verklarende woordenlijst/afkortingen	63
Referenties	66

Voorwoord

Hoe gevoelig ons klimaat is voor broeikasgassen is een sleutelvraag in het wetenschappelijke debat over antropogene klimaatverandering en ook in het publieke debat over wat nu het juiste beleid is in reactie op de stijgende concentratie aan broeikasgassen in de atmosfeer. Klimaatgevoeligheid en de onzekerheden daaromheen zijn belangrijke invoergegevens voor de economische modellen waarmee kosten-baten analyses worden gedaan en waarmee schattingen worden gedaan van de maatschappelijke kosten van CO₂.

De complexiteit en de nuances rond het begrip klimaatgevoeligheid zijn niet gemakkelijk op te maken uit de Summary for Policy Makers (SPM) van de rapporten van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). In de uitgebreidere discussies over klimaatgevoeligheid in het volledige Werkgroep I-rapport ontbreekt de juiste context of uitleg die gemakkelijk te begrijpen is voor diegenen die niet actief de wetenschappelijke literatuur bijhouden.

Dit rapport van Nic Lewis en Marcel Crok dicht dit gat tussen de IPCC-assessments en de onderliggende wetenschappelijke literatuur, door een overzicht te geven van de verschillende methodes om klimaatgevoeligheid te schatten en door het historische perspectief te geven van klimaatgevoeligheid in de verschillende IPCC-rapporten. Zij doen in het rapport ook een eigen onafhankelijke assessment van de verschillende methodes om klimaatgevoeligheid te schatten en ze bekritisieren de assessment van klimaatgevoeligheid in het vierde en vijfde IPCC-rapport.

Het rapport benadrukt dat de bewijzen voor een lage klimaatgevoeligheid zich opstapelen. Ik vind dit rapport een nuttige bijdrage aan het wetenschappelijke debat over dit onderwerp en ook een belangrijke impuls voor de publieke dialoog en het debat over klimaatbeleid.

Ik heb ermee ingestemd om dit rapport te reviewen en om een voorwoord te schrijven omdat ik beide auteurs hoog heb zitten. Ik heb de opkomst van Nic Lewis als een onafhankelijke klimaatonderzoeker en zijn succes bij het publiceren van artikelen over klimaatgevoeligheid in vooraanstaande peer-reviewed tijdschriften met veel belangstelling gevolgd, en ik heb getracht zijn werk te steunen en het te publiceren. Ik heb de afgelopen jaren geregeld contact gehad met Marcel Crok, recent nog als een deelnemer aan climatedialogue.org, en ik waardeer zijn inzichtelijke analyses.

De samenwerking tussen deze twee auteurs heeft geresulteerd in een degelijk, goed opgebouwd en begrijpelijk rapport over de wetenschappelijke kwesties rondom klimaatgevoeligheid en de afwegingen daarover van het IPCC.

Tijdens het schrijven van dit voorwoord realiseerde ik me hoe weinig mogelijkheden er eigenlijk zijn om een dergelijk rapport te publiceren. Ik ben de GWPF dan ook erkentelijk voor het publiceren van dit rapport en voor de publiciteit die ze eraan geven. De publieke verantwoording van nationale en intergouvernementele klimaatwetenschap en beleidsanalyses wordt vergroot door onafhankelijke assessments van hun conclusies en argumenten.

Judith Curry
Atlanta, Georgia, Verenigde Staten van Amerika
Februari 2014

Judith Curry is hoogleraar en hoofd van de School of Earth and Atmospheric Sciences aan het Georgia Institute of Technology. Ze is een fellow van de American Meteorological Society, de American Association for the Advancement of Science en de American Geophysical Union.

Over de auteurs

Nicholas Lewis

Nicholas Lewis is een onafhankelijke klimaatonderzoeker. Hij studeerde wiskunde en natuurkunde aan Cambridge University, maar werkte tot vijf jaar geleden in andere sectoren. Sindsdien doet hij klimaatonderzoek en bestudeert hij statistische methoden die relevant zijn voor klimaatonderzoek. De laatste jaren heeft hij zich voornamelijk geconcentreerd op de moeilijkheid van het schatten van klimaatgevoeligheid en verwante sleutelbegrippen van het klimaat. Met een aantal prominente IPCC-hoofdauteurs publiceerde hij een belangrijke paper op dit gebied. Hij is tevens auteur van een recent artikel dat een klimaatgevoeligheidsstudie, die in het vierde IPCC-rapport figureerde, opnieuw onder de loep nam. Zijn artikel laat zien dat de subjectieve Bayesiaanse methode die in die studie gebruikt werd leidde tot een grove overschatting van het risico op hoge waarden voor klimaatgevoeligheid. Beide papers van Lewis worden geciteerd en bediscussieerd in het recent gepubliceerde vijfde IPCC-rapport.

Marcel Crok

Marcel Crok is een freelance wetenschapsjournalist die woont en werkt in Amsterdam. Hij werkte in het verleden voor het populairwetenschappelijke maandblad *Natuurwetenschap & Techniek* (recent omgedoopt tot de Nederlandse editie van *New Scientist*). In 2005 publiceerde hij een lang artikel over de beruchte hockeystickgrafiek, waarin de kritiek van Stephen McIntyre en Ross McKittrick op die grafiek uitgebreid aan de orde kwam. Crok publiceerde in 2010 een boek (*De Staat van het Klimaat*) over de opwarming van de aarde. Na Climategate en de commotie over fouten in het vierde IPCC-rapport vroeg de Nederlandse overheid hem om het vijfde IPCC-rapport als expert reviewer te reviewen. Samen met de Nederlandse overheidsinstellingen KNMI en PBL (Planbureau voor de Leefomgeving) heeft Crok tevens een internationaal discussieplatform opgezet, climatedialogue.org, dat een constructieve dialoog faciliteert tussen klimaatonderzoekers met verschillende visies.

Samenvatting

1. Het wetenschappelijke deel (WGI) van het onlangs gepubliceerde¹ vijfde IPCC-rapport (AR5) bevat opwekkende informatie. De beste observationele schattingen wijzen erop dat het klimaat aanzienlijk minder gevoelig is voor broeikasgassen dan klimaatonderzoekers tot nu toe dachten. De aanwijzingen hiervoor en de relevante wetenschappelijke artikelen worden alle genoemd in het volledige IPCC-rapport. Deze belangrijke conclusie is echter niet getrokken in het volledige rapport – het wordt slechts als een mogelijkheid geopperd – en is niet gemeld in de Summary for Policymakers (SPM).

2. De dertig jaar voorafgaand aan AR5 veranderde er bijna niets aan de beste schatting en de onzekerheidsmarge voor klimaatgevoeligheid. De beste schatting voor de zogenaamde evenwichtsklimaatgevoeligheid (*equilibrium climate sensitivity* (ECS)) begon en eindigde op 3°C en de onzekerheidsmarge² had in het algemeen een ondergrens van 1,5°C³ en een bovengrens van 4,5°C. Diverse recente wetenschappelijke studies komen echter uit op beste schattingen van tussen de 1,5°C en 2°C, aanzienlijk lager dus dan het merendeel van de oudere studies aangeven.

3. In het vierde IPCC-rapport waren de empirische schattingen van klimaatgevoeligheid niet alleen gebaseerd op data die inmiddels achterhaald zijn maar ook op een verkeerde statistische methode, met een bias naar hogere waarden tot gevolg, wat het klimaatprobleem 'erger' leek te maken. In het vijfde IPCC-rapport gebruiken vele studies nog altijd achterhaalde data en/of een verkeerde statistische methodiek. Er zijn nu echter diverse empirische schattingen van klimaatgevoeligheid beschikbaar, gebaseerd op een degelijke methodiek en geschikte data, die substantieel lagere waarden geven dan simulaties met klimaatmodellen, zowel voor de opwarming op de lange termijn alsmede de opwarming aan het eind van deze eeuw.

4. Sinds het vierde IPCC-rapport is de concentratie aan broeikasgassen verder gestegen, maar de mondiale temperatuur niet; en nog belangrijker, de schattingen voor het afkoelende effect van aerosolen zijn naar beneden bijgesteld. Deze combinatie van factoren is indicatief voor een klimaatsysteem dat minder gevoelig is voor broeikasgassen dan voorheen werd gedacht. De nieuwe

¹De 'final draft' van het Werkgroep I-rapport van AR5 en de goedgekeurde Summary for Policymakers (SPM) werden in september 2013 gepubliceerd. Een gecorrigeerde definitieve versie van de SPM werd eind januari 2014 vrijgegeven.

²'Waarschijnlijk' (likely) is in de laatste twee IPCC-rapporten gedefinieerd als tweederde kans; voor die tijd werd er geen kansverwachting aan gekoppeld.

³Het vierde IPCC-rapport uit 2007 verhoogde de ondergrens tot 2°C.

bewijzen voor het effect van aerosolen zijn echter nog niet toegepast in de klimaatmodellen.

5. De mondiale klimaatmodellen die gebruikt worden om toekomstige klimaatverandering te voorspellen genereren nog altijd een klimaatgevoeligheid in de orde van 2–4,5°C, met een gemiddelde van iets boven de 3°C. Grote delen van het IPCC-rapport leunen op deze computersimulaties. Vrijwel alle projecties van toekomstige klimaatverandering zijn erop gebaseerd,⁴ en een heel hoofdstuk is gewijd aan de performance van de modellen. In het IPCC-rapport toegeven dat de beste observationele schattingen⁵ voor klimaatgevoeligheid nu slechts 1,5–2°C zijn zou erop neerkomen dat grote delen van het IPCC-rapport uit de pas lopen met de laatste stand van de wetenschap.

6. Naar onze mening zaten de IPCC WGI-onderzoekers opgezaald met een dilemma. Hoe moesten ze omgaan met de discrepantie tussen de schattingen voor klimaatgevoeligheid gebaseerd op modellen enerzijds en op waarnemingen, die in overeenstemming zijn met de meest recente inzichten voor aerosolen, anderzijds? In samenwerking met de landendelegaties – die het laatste woord hebben over de precieze formulering van de SPM – lijken ze besloten te hebben dit dilemma op de volgende wijze op te lossen. Ze pasten ten eerste de waarschijnlijkheidsrange (*'likely' range*) voor klimaatgevoeligheid iets aan. Het was 2–4,5°C in het vierde IPCC-rapport (AR4) in 2007. De ondergrens is nu verlaagd tot 1,5°C en de range is dus 1,5–4,5°C. Door dit te doen gaven ze aan rekening te houden met de nieuwe lagere schattingen die recent zijn gepubliceerd in de literatuur.

7. Ze besloten ten tweede om geen beste schatting voor klimaatgevoeligheid te geven. Sinds het Charney-rapport in 1979 hebben vrijwel alle internationale assessments (de enige uitzondering is het derde IPCC-rapport uit 2001) altijd een beste schatting voor klimaatgevoeligheid gegeven. In het vierde IPCC-rapport was de beste schatting 3°C. Bij de goedkeuring van de SPM door alle landen, in september 2013, werd de beslissing om geen beste schatting te geven voor klimaatgevoeligheid slechts vermeld in een voetnoot, met als reden 'een gebrek aan overeenstemming over de waardes tussen verschillende bewijzen en studies'. Pas in het definitieve rapport, dat eind januari 2014 werd

⁴Geprojecteerde opwarming, die minder dan evenredig toeneemt met ECS vanwege het dempende effect van de warmte-opname door de oceanen, zou in de modellen in theorie overeen kunnen komen met de waarnemingen ondanks het feit dat dat voor de ECS niet geldt. Maar het blijkt niet het geval te zijn.

⁵Observationele methoden maken enigszins gebruik van modellen, maar de manier waarop ze gebruikt worden om klimaatgevoeligheid uit observaties af te leiden verschilt enorm van de manier waarop mondiale klimaatmodellen dat doen.

Een gevoelige kwestie

gepubliceerd, was er een paragraaf over toegevoegd in de Technical Summary die iets meer uitleg gaf.

8. De SPM had op zijn minst een uitgebreidere uitleg kunnen geven over de beslissing om de waarschijnlijkheidsrange voor klimaatgevoeligheid te verbreden en om geen beste schatting te geven. Dat had gekund in de vorm van een onomwonden statement dat het beste observationele bewijs, gebaseerd op de verbeterde schattingen voor het effect van aerosolen en de langere tijdreeks voor de mondiale temperatuur, wijst op een beste schatting voor de evenwichtsklimaatgevoeligheid van 2°C of iets minder terwijl klimaatmodellen nog steeds suggereren dat het 3°C is of iets meer. Wij – de auteurs van dit rapport – waren beiden expert reviewers van AR5 en in onze review commentaren hebben we gesuggereerd dat het IPCC een stap verder moest gaan en verschillende ranges voor klimaatgevoeligheid zou moeten presenteren gebaseerd op enerzijds de modellen en anderzijds de kwalitatief hoogwaardige observationele studies.

9. In dit rapport stellen wij voor dat de nieuwe op observaties gebaseerde waarschijnlijkheidsrange 1,25–3,0°C zou kunnen zijn met een beste schatting van 1,75°C.⁶ Als het IPCC die stap had gezet – wat in overeenstemming zou zijn geweest met de beste wetenschappelijke kennis van dit moment – dan zou dat door alle media in de wereld opgepikt zijn als een van de, zo niet de belangrijkste, conclusie van het rapport. En terecht.

10. Het IPCC voelde zich er in AR5 nog zekerder van (95% zeker terwijl het 90% was in AR4) dat de mens het merendeel (tenminste 50%) van de opwarming sinds 1950 veroorzaakt heeft. De media beschouwden dit als de belangrijkste conclusie van AR5 terwijl het in feite een relatief onbeduidende uitspraak is. De kwalitatief hoogwaardige observationele schattingen voor klimaatgevoeligheid, die in dit rapport besproken worden, gaan ervan uit dat vrijwel alle opwarming (en niet sinds 1950, maar over de afgelopen 100-150 jaar) door de mens komt. De veel belangrijkere vraag nu is hoeveel opwarming we in de toekomst bij verschillende scenario's kunnen verwachten.

11. De overgangsklimaatgevoeligheid (transient climate response (TCR)), een maat voor de opwarming als gevolg van een verdubbeling van de CO₂-concentratie over een periode van zeventig jaar, is verwand aan de klimaatgevoeligheid en weerspiegelt ook de efficiency waarmee de oceanen warmte opnemen en wordt vaak gezien als een betere indicatie voor opwarming in de 21e

⁶Dit is gebaseerd op onze keuze om het meeste belang te hechten aan kwalitatief hoogwaardige schattingen voor ECS die instrumentele data gebruiken, overeenkomstig IPCC's eigen oordeel, en door studies met flinke tekortkomingen te negeren.

eeuw dan de evenwichtsklimaatgevoeligheid.⁷ AR5 verlaagt de 10–90% range voor TCR van 1–3°C in AR4 tot een waarschijnlijkheidsrange van 1–2,5°C. In dit rapport suggereren wij dat een op observaties gebaseerde waarschijnlijkheidsrange voor TCR redelijkerwijs 1–2°C kan zijn, met een beste schatting van 1,35°C. De TCR van klimaatmodellen ligt met een gemiddelde van iets onder 2°C veel hoger.

12. Deze lagere, op waarnemingen gebaseerde schattingen voor klimaatgevoeligheid en TCR suggereren dat we in de toekomst aanzienlijk minder opwarming en zeespiegelstijging hoeven te verwachten dan de modelprojecties aangeven. De verwachte opwarming gebaseerd op de ‘observationale’ TCR ligt 35–50% lager dan de op modellen gebaseerde projecties van het IPCC. Bij het op een na hoogste emissiescenario van het IPCC zou de opwarming in de periode 2081-2100 liggen in de buurt van de internationale tweegradendoelstelling.

13. Onze kritiek is gericht op de IPCC als organisatie,⁸ op de beperkingen die het IPCC-proces met zich meebrengt en op de overdreven nadruk die het IPCC legt op projecties en andere uitkomsten van klimaatmodellen. De IPCC-auteurs waren met handen en voeten gebonden aan dit proces; de scope en zelfs de titels van de verschillende hoofdstukken waren al bepaald. Zelfs onderscheid maken tussen verschillende modellen zou politiek gezien lastig geweest zijn.

14. Het doel van het IPCC is om op een ‘allesomvattende, objectieve, open en transparante wijze de wetenschappelijke, technologische en socio-economische kennis, die van belang is om het risico van antropogene klimaatverandering te begrijpen, te beoordelen’.⁹ Wij zijn van mening dat, grotendeels als gevolg van de beperkingen die de model-geïntereerde aanpak van het IPCC met zich meebrengt, zowel het WGI-rapport als de SPM er in het geval van klimaatgevoeligheid, een van de belangrijkste zo niet de belangrijkste parameter uit de klimaatdiscussie, niet in geslaagd is een bevredigende assessment te doen.

⁷Zeespiegelstijging hangt af van de verhouding tussen ECS en TCR alsmede TCR zelf.

⁸Het IPCC is zelf geen onderzoeksorganisatie, maar het IPCC-proces heft wel degelijk een grote invloed op het onderzoek van klimaatonderzoekers, met name op het doen van simulaties met klimaatmodellen.

⁹http://www.ipcc.ch/organization/organization_history.shtml.

Introductie

Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) van de Verenigde Naties (VN) publiceerde eind september 2013 het eerste en belangrijkste deel van haar vijfde assessment-rapport (AR5): het Werkgroep I (WGI) rapport, getiteld *Climate Change 2013, The Physical Science Basis*.¹⁰ Concepthoofdstukken van het rapport waren al ruim daarvoor uitgelekt en besproken in de media. De belangrijkste conclusie, gepresenteerd in de Summary for Policymakers (SPM), was voor velen daarom geen verrassing. Het IPCC voelde zich nog zekerder over de rol van de mens op het klimaat dan in het vorige rapport in 2007. De SPM beweert dat wetenschappers er nu 95% (ten opzichte van 90% in 2007) zeker van zijn dat het merendeel van de opwarming sinds 1950 het gevolg is van menselijke invloeden.¹¹

Dit rapport is een reactie op het AR5 WGI-rapport. Wij – de auteurs van dit rapport – waren beiden expert reviewers van AR5. Heel wat van onze commentaren hadden betrekking op klimaatgevoeligheid, een sleutelbegrip in het klimaatdebat. Dit rapport bespreekt hoe AR5 is omgegaan met klimaatgevoeligheid.

Simpel gezegd, als het klimaat erg gevoelig is voor broeikasgassen en klimaatgevoeligheid dus hoog is, dan kunnen we de komende eeuw aardig wat opwarming verwachten als de emissie van broeikasgassen niet drastisch aan banden gelegd wordt. Als klimaatgevoeligheid laag is, dan zal er aanzienlijk minder opwarming plaatsvinden en ook de stijging van de zeespiegel zal kleiner zijn.

Klimaatgevoeligheid is gedefinieerd als de toename van de mondiale temperatuur aan het oppervlak als gevolg van een verdubbeling van de CO₂-concentratie in de atmosfeer. De term verwijst in het algemeen naar de totale mondiale opwarming nadat het systeem volledig is opgewarmd, een proces dat

¹⁰Het definitieve WGI-rapport, gepubliceerd op 30 januari 2014 is te downloaden via <http://www.climatechange2013.org/>. Er zijn in het definitieve rapport heel wat kleine wijzigingen aangebracht ten opzichte van de versie die eind September werd vrijgegeven daags na goedkeuring van de SPM. Er werden ook kleine wijzigingen aangebracht in de SPM. Als wij 'AR5' schrijven in dit rapport dan bedoelen we het WGI-rapport van AR5 tenzij anders is aangegeven.

¹¹Er is enige verwarring over deze belangrijke conclusie. AR5 herhaalde de claim uit AR4 dat het zeer waarschijnlijk is (very likely, 90% zeker) is dat antropogene broeikasgassen verantwoordelijk zijn voor meer dan de helft van de opwarming sinds 1950. Zij verhoogden de waarschijnlijkheid echter tot extreem waarschijnlijk (extremely likely, 95% zeker) voor de bredere term 'menselijke invloed'. Hiertoe behoren ook andere menselijke invloeden zoals roet, sulfaataerosolen en veranderd landgebruik. De beste schattingen in AR5 geven echter aan dat alle opwarming sinds 1950 het gevolg is van antropogene invloeden.

meer dan duizend jaar in beslag neemt vanwege de enorme warmtecapaciteit van de oceanen. Deze zogenaamde evenwichtsklimaatgevoeligheid (*equilibrium climate sensitivity* (ECS)) is de traditionele en nog altijd meest gebruikte maat. In de praktijk is het meestal de 'effectieve klimaatgevoeligheid' die geschat wordt,¹² een begrip dat nauw verwand is aan ECS en dat praktischer is om mee te werken. De twee termen worden als synoniemen beschouwd in dit rapport, zoals feitelijk ook in AR5 gebeurt.

Een variant van klimaatgevoeligheid voor de kortere termijn is de zogenaamde overgangsklimaatgevoeligheid (*transient climate response* (TCR)). De TCR is gedefinieerd als de opwarming over een periode van zeventig jaar waarin de CO₂-concentratie verdubbelt.¹³ TCR kan makkelijker geschat worden dan ECS en is relevanter voor projecties van de opwarming – hoewel niet voor zeespiegelstijging – gedurende de rest van deze eeuw.¹⁴ We zullen later in dit rapport schattingen laten zien van zowel ECS als TCR.¹⁵

Je zou kunnen opmerken dat het concept klimaatgevoeligheid nogal simplistisch is. Studies¹⁶ met complexe klimaatmodellen laten echter zien dat veranderingen in allerlei belangrijke klimaatvariabelen nauw samenhangen met veranderingen in de mondiale temperatuur. Dat pleit voor de bruikbaarheid van een mondiale klimaatgevoeligheid.

Hoewel er een hoop valt te zeggen over de relevantie van het concept evenwichtsklimaatgevoeligheid, is het een feit dat klimaatgevoeligheid een belangrijke rol heeft gespeeld en nog steeds speelt in de debatten over de opwarming van de aarde, niet alleen in wetenschappelijke maar ook in politieke discussies.

In de internationale politieke arena is het uiteindelijke doel, al twee decennia lang, om de opwarming van de aarde, zoals het UN Framework Convention

¹²Dit geldt ook voor schattingen met klimaatmodellen. Merk op dat langzame processen (zoals de reactie van ijskappen en vegetatie) niet bij de definitie van ECS zijn inbegrepen.

¹³De toename aan CO₂ vindt bij de definitie in een constant tempo plaats, maar kleine fluctuaties daarin zijn onbelangrijk. De schatting voor TCR wordt niet beïnvloed door het precieze tempo waarin CO₂ toeneemt zolang de verandering in de mondiale temperatuur dienovereenkomstig geschaald worden, en ook de lengte van de periode heeft weinig invloed op TCR, tenminst zolang het om 60–80 jaar gaat.

¹⁴Hoewel TCR gemakkelijk te schatten is heeft het minder dan ECS een bruikbare interpretatie wat betreft de fysica van het klimaatsysteem. TCR is kleiner dan ECS omdat de energie die in de oceanen gaat zitten bijdraagt aan ECS maar niet aan TCR.

¹⁵De opwarming door CO₂ neemt logaritmisch toe met de concentratie. ECS en TCR kun je gebruiken om de toename in de mondiale temperatuur te schatten voor iedere willekeurige stijging in CO₂ door ze naar rato aan ta passen aan de verandering in log₂ (CO₂-concentration).

¹⁶Harris et al. (2006) bijvoorbeeld stelde dat het ruimtelijke patroon bij evenwicht na en verdubbeling van CO₂ een goede benadering is voor het patroon gedurende de hele periode van CO₂-toename. Zie ook sectie 12.4.2 van AR5.

Een gevoelige kwestie

on Climate Change het zegt te beperken tot een niveau dat een 'gevaarlijke menselijke verstoring' van het klimaat voorkomt. De laatste jaren is dit enigszins willekeurig gedefinieerd als het voorkomen van twee graden opwarming ten opzichte van de temperatuur van voor de industriële revolutie. We zijn al 0,8°C onderweg en hebben dus nog slechts 1,2°C te gaan. Met een klimaatgevoeligheid van 3°C, wat de gemiddelde waarde is van klimaatmodellen, zal de tweegradengrens zeer waarschijnlijk later deze eeuw bereikt worden, voornamelijk afhankelijk van hoe snel de emissies van broeikasgassen toenemen.

De wetenschappelijke validiteit van de tweegradendoelstelling is ter discussie gesteld.¹⁷ Jaeger (2011) bijvoorbeeld merkte op dat:

De tweegradenlimiet is bijna bij toeval opgekomen en heeft zich op een wat tegenstrijdige manier ontwikkeld: beleidsmakers behandelen het als een wetenschappelijke bevinding, wetenschappers daarentegen als een politieke kwestie. Het is gepresenteerd als een scheidslijn tussen een veilig en een catastrofaal klimaat en als een richtpunt voor een optimale strategie om kosten te minimaliseren en baten te maximaliseren. Wij stellen voor om het als focus te gebruiken in een coördinatiespelletje, waarbij een veelvoud aan deelnemers een nieuw coördinatie-evenwicht dienen te vinden in de omgang met klimaatrisico's.

Tol (2007) concludeerde dat 'deze doelstelling nogal zwak onderbouwd is en gebaseerd is op ondermaatse methodes, slordige redenering en het selectief citeren van een klein aantal studies'. Desalniettemin merkte Van der Sluijs¹⁸ in 1998 in een zeer toepasselijk artikel op dat het concept klimaatgevoeligheid 'opereert als een "anker" dat de wetenschappelijke basis legt voor het debat over klimaatbeleid'. Om deze reden blijven het concept klimaatgevoeligheid en afgeleide parameters zoals TCR zeer belangrijk, zowel in wetenschappelijke als politieke kringen.

Onverwachte beslissing in AR5

Al meer dan dertig jaar publiceren internationale assessments, inclusief die van het IPCC, een onzekerheidsmarge en doorgaans een beste schatting voor de evenwichtsklimaatgevoeligheid (ECS). Meestal was de onzekerheidsmarge

¹⁷ Jaeger and Jaeger (2011); Tol (2007).

¹⁸ J.P. van der Sluijs et al. (1998).

1,5–4,5°C en de beste schatting 3°C. Het laatste IPCC-rapport, AR4,¹⁹ stelde de ondergrens iets naar boven bij waardoor de range 2–4,5°C werd,²⁰ maar AR5 herstelde de ondergrens weer tot 1,5°C, waarmee de range voor ECS weer 1,5–4,5°C was. In feite gaf AR5 hiermee toe dat de assessment in AR4 dubieus was. AR5 gaf echter geen beste schatting voor ECS.

Gezien het belang van deze beslissing zou je verwachten dat de SPM, en het volledige WGI-rapport dat een paar dagen later werd vrijgegeven, in enige detail zou treden over de redenen om geen beste schatting te geven. Dat was echter niet het geval. De beleidsmaker en de geïnteresseerde lezer moeten het doen met voetnoot 16 in de SPM die zegt:

Er kan nu geen beste schatting voor de evenwichtsklimaatgevoeligheid gegeven worden vanwege een gebrek aan overeenstemming over de waardes tussen verschillende bewijzen en studies.

De ECS is misschien wel de belangrijkste parameter in de klimaatwetenschap en de beslissing om geen verdere indicatie te geven of de beste schatting aan de onderkant van de waarschijnlijkheidsrange ligt, in het midden of aan de bovenkant was onverwacht.²¹ Dat het IPCC slechts een beperkte uitleg gaf en slechts in een voetnoot was nogal verrassend.

De volledige paragraaf in de SPM over klimaatgevoeligheid luidt als volgt (onze nadruk):²²

De evenwichtsklimaatgevoeligheid kwantificeert de respons van het klimaatsysteem op een constante stralingsforcering over een tijdschaal van meerdere eeuwen. Het is gedefinieerd als een verandering in de mondiale oppervlaktetemperatuur bij evenwicht als gevolg van een verdubbeling van de CO₂-concentratie in de atmosfeer. De evenwichtsklimaatgevoeligheid ligt waarschijnlijk in de range van 1,5°C to 4,5°C (hoog vertrouwen). Het is extreem onwaarschijnlijk dat de evenwichtsklimaatgevoeligheid kleiner dan 1°C is (hoog vertrouwen) en zeer onwaarschijnlijk dat die groter is dan 6°C (middelmatig vertrouwen). De ondergrens van de waarschijnlijkheidsrange is dus lager dan de 2°C in het AR4-rapport,

¹⁹Het vierde IPCC-rapport uit 2007.

²⁰Waarschijnlijkheidsrange, gedefinieerd als de kans van 66% of meer – of anders gezegd een 17–83% waarschijnlijkheidsrange – in AR4 en AR5; voor AR4 niet gedefinieerd in termen van kans.

²¹De Second Order Draft van AR5 stelde in Box 12.2 over ECS: 'De meest waarschijnlijke waarde blijft in de buurt van de 3°C.'

²²In sectie D.2 van de SPM. Het concept stralingsforcering wordt uitgelegd in de sectie over de energiebalans-schatting voor ECS op pagina 17.

Een gevoelige kwestie

maar de bovengrens is hetzelfde. *Deze assessment weerspiegelt ons toegenomen inzicht, de langere tijdreeks van temperatuurmetingen in de atmosfeer en de oceanen, en de nieuwe schattingen voor de stralingsforcering.* {TFE6.1, Figure 1; Box 12.2}

De sleutel achter de beslissing om geen beste schatting te geven ligt opgesloten in de laatste zin van deze paragraaf. Wij vermoeden dat slechts weinig beleidsmakers dit opgemerkt zullen hebben. Met deze zin geeft het IPCC aan dat ze de ondergrens voor ECS moesten verlagen tot 1,5°C vanwege 'ons toegenomen inzicht, de langere tijdreeks van temperatuurmetingen in de atmosfeer en de oceanen, en de nieuwe schattingen voor de stralingsforcering'. Wij zijn het met bovenstaande zin eens maar we vinden dat de consequenties van dit 'toegenomen inzicht' veel verregaander zijn dan het AR5-rapport ons heeft doen willen geloven. In dit rapport zullen we uitleggen waarom.

De geschiedenis van klimaatgevoeligheid

Het concept klimaatgevoeligheid gaat helemaal terug naar het werk van Arrhenius (1896), een van de grondleggers van de broeikastheorie, die als eerste het effect van een verdubbeling van de CO₂-concentratie in de atmosfeer becijferde. Later, in jaren '60 en '70, bevestigden berekeningen met grootschaligere modellen de berekeningen van Arrhenius en zodoende werd het concept klimaatgevoeligheid stevig verankerd.²³

Een rapport van de National Academy of Sciences in 1979 (het Charney-rapport) wordt gezien als de eerste belangrijke assessment van klimaatgevoeligheid. In die periode waren schattingen voor klimaatgevoeligheid al gebaseerd op numerieke klimaatmodellen, zogenaamde *general circulation models* (GCMs; ook wel mondiale klimaatmodellen genaamd). Ten tijde van het Charney-rapport waren er slechts twee van zulke modellen beschikbaar. De een had een klimaatgevoeligheid van 2°C en de ander van 4°C, wat de beste schatting van 3°C verklaart.

Tabel 1 laat de ontwikkeling zien van zowel de range als de beste schatting voor ECS gedurende de afgelopen 35 jaar. Zoals te zien is er weinig veranderd. De tabel laat ook de ontwikkeling van de range voor de TCR zien sinds die in 2001 voor het eerst werd gegeven. Geen enkel rapport gaf ooit een beste schatting voor TCR.

²³Schlesinger et al. (2007).

Tabel 1: Ontwikkeling van de schattingen voor evenwichtsklimaatgevoeligheid (ECS) in de afgelopen 35 jaar en voor de range van de overgangsklimaatgevoeligheid (TCR) sinds 2001

	ECS Range (°C)	ECS Beste schatting (°C)	TCR Range (°C)
Charney Report 1979	1,5–4,5	3,0	
NAS Report 1983	1,5–4,5	3,0	
Villach Conference 1985	1,5–4,5	3,0	
IPCC First Assessment 1990	1,5–4,5	2,5	
IPCC Second Assessment 1995	1,5–4,5	2,5	
IPCC Third Assessment 2001	1,5–4,5	Geen	1,1–3,1 ^a
IPCC Fourth Assessment 2007	2,0–4,5 ^b	3,0	1,0–3,0 ^c
IPCC Fifth Assessment 2013	1,5–4,5 ^d	Geen	1,0–2,5 ^d

^a Range voor AOGCMs. ^b 17–83% range; voor AR4 waren de ranges niet duidelijk gedefinieerd in kanstermen. ^c 10–90% range. ^d Waarschijnlijkheidsrange.

Simulaties met mondiale klimaatmodellen hebben altijd een sleutelrol gespeeld bij het bepalen van ECS. Aanvankelijk simuleerden GCMs de oceanen nog niet maar tegenwoordig worden GCMs gebruikt met gekoppelde atmosfeer-oceaanmodellen (AOGCMs). AOGCMs hebben wisselende klimaatgevoeligheden maar het gemiddelde van alle door het IPCC gebruikte modellen ligt rond de 3°C, dichtbij de waarde voor de beste schatting in de afgelopen 35 jaar. Zoals te zien is in de tabel viel de beste schatting voor ECS meestal ongeveer middenin de gegeven range.

De TCR van klimaatmodellen is ook af te leiden uit modelsimulaties. Gemiddeld komen AOGCMs uit op een TCR van ongeveer 1,8°C.

Van der Sluijs (1998)²⁴ besprak de redenen waarom de range voor klimaatgevoeligheid zo weinig veranderde in een periode waarin de wetenschap enorm evolueerde. Hij concludeerde dat de range slechts gedeeltelijk bepaald werd door de wetenschap zelf en dat diverse andere factoren ook een rol speelden. Een daarvan was 'de noodzaak om een solide wetenschappelijke basis te creëren en te handhaven' voor klimaatbeleid.

Zoals dit rapport duidelijk zal maken zijn de conclusies die Van der Sluijs in 1998 trok tegenwoordig nog steeds toepasselijk. Wij zullen echter beargumenteren dat het observationele bewijs voor een flinke verandering in zowel

²⁴J.P. van der Sluijs et al. (1998).

Een gevoelige kwestie

de range als de beste schatting voor klimaatgevoeligheid nu zo sterk is dat elke serieuze wetenschappelijke assessment die zou moeten bespreken.

Observaties duiden op een lage klimaatgevoeligheid

Sinds het Charney-rapport in 1979 zijn GCMs een belangrijk middel geweest om klimaatgevoeligheid te schatten. En inderdaad was het opkomende antropogene signaal tot aan het eind van de 20e eeuw te klein ten opzichte van meetfouten en de ruis van de natuurlijke klimaatvariabiliteit om tot een betrouwbare observationele schatting voor ECS te komen.

Sindsdien is het signaal echter sterker geworden het is mogelijk geworden om goed afgebakende schattingen te maken voor ECS op basis van observationele meetgegevens uit de instrumentele periode; dat wil zeggen de periode sinds ongeveer 1850, het moment waarop er voldoende temperatuurmetingen beschikbaar zijn om een gemiddelde mondiale temperatuur te berekenen. Het IPCC noemt zulke schattingen 'instrumenteel'.²⁵

Energiebalans schattingen

In 2002 publiceerde de Britse onderzoeker Jonathan Gregory samen met collega's een paper²⁶ waarin ze een simpele en rechttoe rechtaan-methode beschreven om klimaatgevoeligheid af te leiden uit observaties. De auteurs beschreven het voordeel van hun nieuwe methode in hun samenvatting:

Omdat de methode geen gebruik maakt van de klimaatgevoeligheid zoals die wordt gesimuleerd door klimaatmodellen, voorziet zij in een onafhankelijke op waarnemingen gebaseerde afbakening van deze belangrijke parameter van het klimaatsysteem.

²⁵ Observationele methoden maken enigszins gebruik van modellen, maar de manier waarop ze gebruikt worden om klimaatgevoeligheid uit observaties af te leiden verschilt enorm van de manier waarop mondiale klimaatmodellen dat doen.

²⁶ Gregory et al. (2002).

Gezien het belang van deze solide 'energiebalans'-methode voor het schatten van klimaatgevoeligheid zullen we haar in enig detail uitleggen.

Wanneer er sprake is van een evenwicht wordt de binnenkomende zonnestraling bovenin de atmosfeer gedeeltelijk in balans gehouden door de weerkaatsing van zonlicht maar voornamelijk door uitgaande infrarode straling afkomstig uit de atmosfeer en deels zelfs direct van het oppervlak. Als de concentratie aan broeikasgassen stijgt, wat de atmosfeer 'troebeler' maakt voor infrarode straling, of als andere drijvende krachten voor opwarming toenemen, dan leidt dat tot een stralingsonbalans bovenin de atmosfeer. Met andere woorden, ervan uitgaande dat de temperatuur aan het oppervlak niet toeneemt ter compensatie, er komt meer zonlicht binnen dan er aan infrarode straling weer uit gaat. Deze onbalans wordt ook wel de stralingsforcering (*radiative forcing*) genoemd (RF, gemeten in watts per vierkante meter: W/m^2 or Wm^{-2}).

Veronderstel nou dat men de veranderingen meet tussen twee periodes in:²⁷

- de gemiddelde forcering
- de toename van de warmte-inhoud van het klimaatsysteem

Aangezien in iedere periode energie behouden moet blijven, moeten de verschillen tussen deze twee veranderingen wel gecompenseerd zijn door een toename aan straling die het gevolg is van een stijging van de mondiale oppervlaktetemperatuur. Uit onze kennis over al deze veranderingen, gecombineerd met de stralingsforcering die een verdubbeling van de CO_2 -concentratie zal veroorzaken ($F_{2\times CO_2}$) kunnen we de ECS afleiden.²⁸

²⁷Typisch aan het begin en aan het eind van de instrumentele periode, en elke periode tenminste een decennium lang om de effecten van de interne variabiliteit van het klimaat te beperken.

²⁸Aannemende dat we weten hoe groot de forcering door een verdubbeling van de CO_2 -concentraties ($F_{2\times CO_2}$) is, dan kan ECS als volgt bepaald worden: $ECS = F_{2\times CO_2} \times \Delta T / (\Delta F - \Delta Q)$, waar ΔT de verandering in de mondiale temperatuur is, ΔF de verandering in de forcering en ΔQ de verandering in de warmte-opname door de oceanen. Hoewel je in principe ook rekening zou moeten houden met de warmte-opname door de atmosfeer, de ijskappen en andere onderdelen van het klimaatsysteem zijn deze vrijwel verwaarloosbaar ten opzichte van de warmte-opname door de oceanen. Als de toename in forcering ΔF eindigt in een periode van 60 tot 80 jaar dan kan TCR op nagenoeg dezelfde wijze geschat worden: $TCR = F_{2\times CO_2} \times \Delta T / \Delta F$. Merk op dat er voor de schatting van de forcering enige inbreng is van klimaatmodellen. Schattingen voor ECS en TCR uit energiebalans-methodes kunnen beïnvloed zijn door factoren zoals interne klimaatvariabiliteit. Ook neem je aan dat deze vergelijkingen constant zijn in de tijd en opgaan voor een klimaat dat iets warmer is dan dat van vandaag de dag. Maar andere observationele methoden voor het schatten van ECS en TCR hebben ook last van deze en ergere issues en doen over het algemeen veel meer aannames.

Een gevoelige kwestie

De energiebalans-methode wordt ook beschreven in AR5, waarbij wordt opgemerkt dat de berekening van ECS een rechtstreeks gevolg is van behoud van energie.²⁹ AR5 verwoordt het mooi:

$ECS = F_{2 \times CO_2} / \alpha$, waar α de gevoeligheidsparameter is, een maat voor de toegenomen energieflex naar de ruimte per graad opwarming gegeven alle feedbacks die op deze tijdschalen actief zijn. Op basis van behoud van energie geldt daarom dat $ECS = F_{2 \times CO_2} \times \Delta T / (\Delta F - \Delta Q)$, waar ΔQ de verandering is in de warmte-inhoud als gevolg van de stralingsforcering ΔF .

Omdat energiebalans-schattingen van ECS gegrond zijn op fundamentele fysica en omdat er weinig bijkomende aannames worden gedaan, in tegenstelling tot alle andere methoden (inclusief de AOGCMs), zijn ze bijzonder robuust. De methode is echter wel afhankelijk van betrouwbare en redelijk afgebakende schattingen van:

- veranderingen in de mondiale stralingsforcering
- stralingsonbalans bovenin de atmosfeer (of diens tegenhanger, de warmteopname van het klimaatstelsel, voornamelijk de oceanen)
- de mondiale temperatuur.

Maar ervan uitgaande dat dat is gebeurd, bestaat er weinig twijfel over dat die benadering de meest robuuste schattingen voor ECS oplevert. Energiebalans-schattingen zijn in feite de gouden standaard.

De belangrijkste antropogene veranderingen in de troposfeer zijn:

- de toename aan broeikasgassen, leidend tot een positieve forcering met opwarming als gevolg
- de toename aan aerosolen, die door weerkaatsing van zonlicht, al met al leidt tot een negatieve forcering en dus afkoeling.

In tegenstelling tot de voornaamste broeikasgassen is de verblijftijd van aerosolen in de troposfeer erg kort – slechts dagen tot weken – doordat ze met neerslag uit de atmosfeer gehaald worden.

²⁹Sectie 10.8.1 van WGI. Voor de duidelijkheid is het vermenigvuldigingsteken (\times) in de tweede formule expliciet getoond.

Het stralingseffect van broeikasgassen is vrij goed begrepen. Het effect van aerosolen is echter nog heel onzeker. De aerosol-forcing afleiden uit waarnemingen is moeilijk en was praktisch onmogelijk voor de ontwikkeling van geschikte satelliet-instrumentatie.

Gregory et al. vergeleek de staat van het klimaat tussen de periodes 1861–1900 en 1957–1994. Destijds in 2002 moesten ze schattingen voor de aerosol-forcing gebruiken die gebaseerd waren op klimaatmodellen en niet op waarnemingen,³⁰ dus was de studie niet volledig gebaseerd op observaties. Hun beste³¹ schatting voor ECS kwam uit op 6,2°C met een range van 1,1°C tot oneindig en werd, afgebroken bij 10°C, getoond in een prominente Figuur in AR4.³²

Een van ons (Lewis) deed het werk van Gregory et al. over. Hij ontdekte dat Gregory's data voor de warmte-opname door de oceanen in de periode 1957–1994 van een verkeerde dataset afkomstig waren.³³ Die data waren in 2005 naar beneden bijgesteld. Hij ontdekte bovendien dat de verandering in forcing die Gregory had gebruikt slechts half zo groot was als de waarde die NASA gebruikte in hun bekende GISS klimaatmodel. De combinatie van een lage verandering in de forcing en een hoge warmte-opname door de oceanen leidde tot een hoge schatting voor ECS en een zeer lange staart (*long tail* of *fat tail*). Door de gecorrigeerde dataset te gebruiken voor de warmte-inhoud van de oceanen en de GISS modelforcingen zakt de beste schatting voor ECS van 6,2°C tot 1,8°C en ontstaat er een kansverdeling die veel beter afgebakend is.³⁴

Hoe AR4 op een verkeerde schatting voor ECS uitkwam

Voordat we het gaan hebben over hoe klimaatgevoeligheid is behandeld in het AR5-rapport is het nuttig om eerst terug te kijken op het vierde IPCC-rapport uit 2007. Figuur 9.20 in het WGI-rapport van AR4 gaf de geschatte

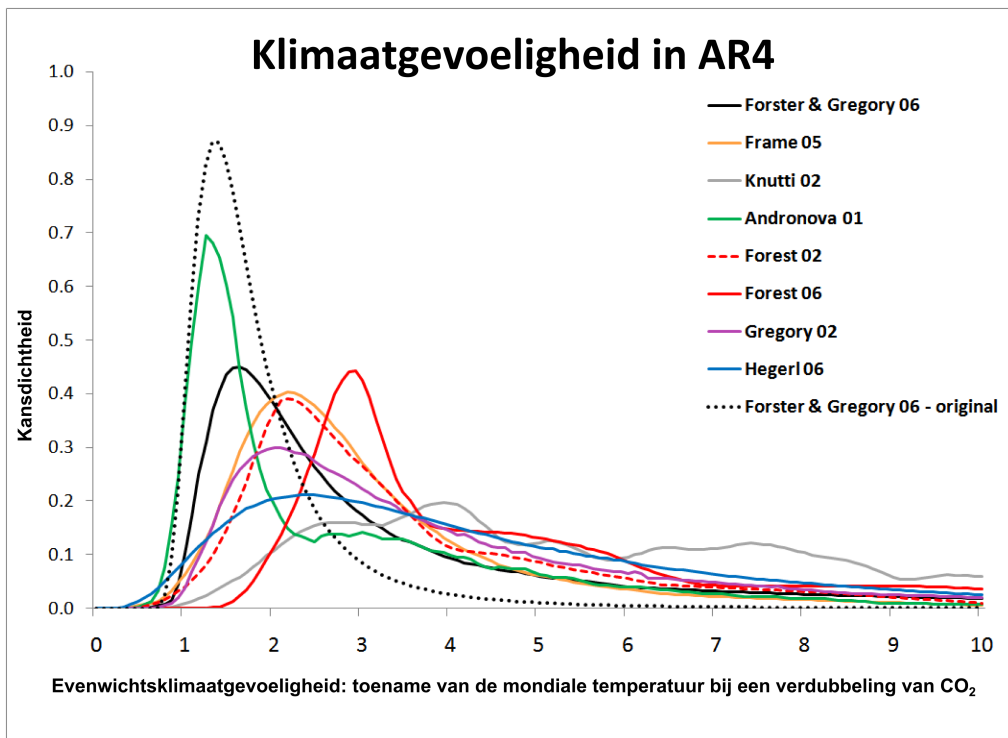
³⁰Hoewel Gregory een attributiemethode gebruikte om zijn modelschatting voor de aerosolforcing te schalen met observaties, was zijn modelschatting voor aerosolforcing nog altijd twee keer zo hoog als de beste schatting in AR5. Gregory moest ook een modelschatting gebruiken voor de warmte-opname door de oceanen in de periode 1861–1900, maar dat had veel minder invloed dan de aerosolforcing.

³¹Alle beste schattingen zijn medianen.

³²http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/figure-9U20.html. Weergegeven in Figuur 1.

³³Levitus et al. (2000).

³⁴<http://judithcurry.com/2011/07/07/climate-sensitivity-follow-up/>. Merk op dat de ECS-schattingen nog lager zouden zijn als de beste schattingen voor de forcing uit AR5 worden gebruikt in plaats van de forceringen uit het GISS-model.



Figuur 1: Replicatie van de PDFs in Figuur 9.20 uit het AR4 WGI-rapport

De gestippelde zwarte lijn is toegevoegd aan de PDFs die oorspronkelijk werden weergegeven in Figuur 9.20 en laat de oorspronkelijke resultaten zien uit de paper Forster/Gregory (2006). Alle PDFs zijn zo geschaald in AR4 dat de volledige kansverdeling tussen (kans van 1 in totaal) tussen 0°C en 10°C komt te liggen.

waarschijnlijkheidsdistributies (*probability density functions* (PDFs)) voor acht op observaties gebaseerde ECS-studies (een ervan was een paleo-studie gebaseerd op data uit het afgelopen millennium³⁵). Deze PDFs zijn weergegeven in Figuur 1. De gestippelde zwarte lijn is door ons toegevoegd. We zullen elk van de studies waarop deze PDFs gebaseerd zijn kort becommentariëren.

Het merendeel van de ECS-schattingen in Figuur 1 is gebaseerd op opwarming gedurende het grootste deel of de volledige instrumentele periode en vergelijkt observaties van diverse klimaatvariabelen, meestal meer dan alleen de mondiale oppervlaktetemperatuur. De meeste studies gebruiken een veelvoud aan simulaties door een simpel model of een gematigd complex klimaat-

³⁵Schattingen uit eerdere perioden, gebaseerd op proxy-data, worden paleoklimaat-schattingen genoemd door het IPCC. Zoals we later zullen bespreken zijn die omgeven met grotere onzekerheden en bakenen ze de ECS-range voor de instrumentele schattingen dus niet verder af.

model (model-observatie vergelijkingsstudies). In tegenstelling tot de AOG-CMs hebben deze modellen verstelbare parameters die afgestemd zijn op de modelgevoeligheid en vaak worden naast ECS ook andere belangrijk eigenschappen van het klimaat geschat, zoals de aerosolforcing en de efficiëntie waarmee warmte wordt opgenomen door de oceanen. Hoe beter de match is tussen de gemodelleerde en de waargenomen waarden bij een bepaalde afstelling van de modelparameters³⁶ hoe groter de kans dat die afstelling de werkelijke waarden van die parameters vertegenwoordigt.

Het merendeel van de studies hanteerde een Bayesiaanse statistische methode. Bayesiaanse statistiek maakt gebruik van het feit dat de onderzoeker al beschikt over informatie (de prior) en de nieuwe data zouden grotendeels een update moeten zijn van die voorafgaande schatting. Dus in plaats van simpelweg een uitkomst te berekenen, wordt er een weging aangebracht die de 'oude' data bijstelt. De kennis die van tevoren beschikbaar was wordt niet volledig vervangen maar aangepast. De Bayesiaanse benadering is zeer geschikt als je te maken hebt met structurele onzekerheid en het gebruik ervan is niet echt controversieel. Maar lezers van wetenschappelijke rapporten die gebaseerd zijn op Bayesiaanse statistiek kunnen gemakkelijk over het hoofd zien dat de keuze voor de prior een aanzienlijk effect kan hebben op het resultaat. Als de gekozen prior zelf controversieel is, dan tast dat de robuustheid van de resultaten flink aan.

Hoewel bij de opzet van wetenschappelijke studies bestaande kennis gebruikt kan worden, is het normaal dat, als de studie-opzet eenmaal vastligt, de resultaten de inzichten weergeven van de gebruikte data. Het is daarom noodzakelijk dat de voorafgaande schatting een eerlijke weergave is, in wiskundige termen, van onze onwetendheid over klimaatgevoeligheid en niet datgene wat de onderzoeker gelooft voordat hij de nieuwe data heeft gezien. Met andere woorden, de prior zou zo gekozen moeten worden dat de invloed op de uiteindelijke schatting voor ECS minimaal is: de prior zou de data voor zichzelf moeten laten spreken. Vrijwel geen van de priors die in AR4 en AR5 zijn gebruikt voldoet aan dat criterium.

Over de Gregory et al. (2002) schatting hebben we het al gehad. Alle andere studies, met uitzondering van Forster and Gregory (2006), waren model-observatie vergelijkingsstudies, waaronder een paleostudie. Die studie, Hegerl et al. (2006), gaf geen bruikbare afgebakende schatting voor ECS. Knutti

³⁶Hoe waarschijnlijk, gegeven de onzekerheden, het verkrijgen van de waargenomen waarden is ervan uitgaande dat de modelwaarden correct zijn.

Een gevoelige kwestie

et al. (2002) constateerden eveneens dat hun observationele randvoorwaarden een goed afgebakende ECS-schatting niet mogelijk maakte; Ze stelden wel een ondergrens vast voor ECS van $1,2^{\circ}\text{C}$, maar die waarde is te hoog door het gebruik van dezelfde verkeerde dataset die Gregory et al. (2002) gebruikten. Bovendien gebruikten beide studies ongeschikte 'uniform priors'³⁷ voor ECS, met eveneens een bias naar hogere schattingen als gevolg. Sinds AR4 is het gebruik van 'uniform priors' voor ECS-schattingen sterk bekritiseerd.³⁸ Drie van de overige studies gebruikten ook 'uniform priors', zowel voor ECS als voor de efficiency waarmee de oceanen warmte opnemen, wat een nog grotere bias naar hogere waarden voor ECS gaf. Een³⁹ van deze drie studies was slecht opgezet en had last van statistische fouten; een tweede⁴⁰ gebruikte verkeerde data voor oceaanwarmte; en de derde⁴¹ werd door beide beïnvloed. Weer een andere studie, Andronova en Schlesinger (2001) deed onrealistische aannames voor de forcering en lijkt ook last te hebben gehad van een fout in hun softwareprogramma dat de resultaten omhoog stuwde.⁴²

Uiteindelijk blijft er slechts één studie ter overweging over: Forster en Gregory (2006). In tegenstelling tot alle andere instrumentele studies ontleende die studie een schatting voor ECS die vrijwel volledig gebaseerd was op observaties en die geen verder geen overduidelijke tekortkomingen heeft zoals verkeerde data of een gebrekkige methodologie. Forster and Gregory gebruikten satellietmetingen van veranderingen in de stralingsbalans bovenin de atmosfeer en koppelden die aan veranderingen in de mondiale temperatuur. Dat levert een directe schatting op van klimaatgevoeligheid, die vrijwel niet afhankelijk is van veranderingen in aerosolen.⁴³ In hun oorspronkelijke artikel waren de resultaten behoorlijk goed afgebakend, wat wil zeggen dat

³⁷ Hierbij geef je aanvankelijk alle mogelijke waarden in een brede (of zelfs oneindig brede) range evenveel gewicht, voordat je de kansverdeling bijstelt op basis van de werkelijke data. Het gebruik van 'uniform priors' gaat normaal gesproken goed als er een lineair verband bestaat tussen je data en de te schatten parameters. Maar als zoals hier de relaties met de klimaatparameters sterk niet-lineair zijn dan verstoren de 'uniform priors' de schattingen enorm (tenzij de PDF zeer smal is).

³⁸ Annan and Hargreaves (2011) schreven dat 'de uniform priors, die vaak gebruikt zijn, gaan uit van aannames die naar onze mening extreem zijn en moeilijk te verantwoorden'. Jewson (2013) stelde dat 'Vlakke [uniform] priors zijn vrijwel nooit te rechtvaardigen...'; en dat geen van de klimaatgevoelighedsstudies in AR4 die er gebruik van maakte betrouwbare schattingen zou opleveren.

³⁹ Forest et al. (2006).

⁴⁰ Frame et al. (2005).

⁴¹ Forest et al. (2002).

⁴² Zie Ring et al. (2012).

⁴³ Hoewel dit type studie, zoals ook besproken in voetnoot 60, geen onderscheid kan maken tussen de effecten van veranderingen in wolken die het gevolg zijn van temperatuurveranderingen en de effecten spontane veranderingen in het wolkendek, concluderen Forster en Gregory dat dat bij hun regressiemethode eerder leidt tot een bias in ECS naar boven dan naar beneden. Bovendien leidt het meenemen van het jaar 1992, waarin de mondiale temperatuur daalde door de uitbarsting van de Pinatubo, waarschijnlijk tot verdunning van de versturende effecten van de interne wolkenvariabiliteit.

de range voor de mogelijke waarden van klimaatgevoeligheid beperkt was. Hun beste schatting was $1,6^{\circ}\text{C}$, de waarschijnlijkheidsrange was $1,2\text{--}2,3^{\circ}\text{C}$ en 95% van de waarschijnlijkheidsverdeling lag in de range $1,0\text{--}4,1^{\circ}\text{C}$.

AR4 verdraaide echter de resultaten van Forster en Gregory door ze om te zetten naar een schatting gebaseerd op een 'uniform prior' voor ECS. De kansverdeling in AR4 – de zwarte lijn in Figuur 1 – is scheef getrokken naar aanzienlijk hogere waarden voor klimaatgevoeligheid en heeft een veel langere staart dan de oorspronkelijke curve, zoals te zien aan de gestippelde zwarte lijn in Figuur 1. De bovengrens van de waarschijnlijkheidsmarge is verdubbeld, van $2,3$ naar $4,7^{\circ}\text{C}$, en de beste schatting nam toe van $1,6$ tot $2,3^{\circ}\text{C}$.

Er zijn diverse fouten ontdekt in AR4 waaronder de veelbesproken overschatting van de snelheid waarmee de gletsjers in de Himalaya zouden smelten. Diegenen die het IPCC verdedigen wijzen erop dat de fouten onopzettelijk waren en ook onbelangrijk: ze ondermijnden het wetenschappelijke fundament van AR4 niet.

De verdraaiing die we hier hebben beschreven, die het gevolg was van de onverantwoorde aanpassing door het IPCC van een peer-reviewed grafiek, vond in tegenstelling tot alle andere ontdekte fouten, die uit het Werkgroep II rapport kwamen, plaats in het Werkgroep I rapport van AR4. De fout was zeer cruciaal,⁴⁴ aangezien het de enige kwalitatief hoogwaardige schatting voor ECS betrof in het rapport en omdat de verdraaiing het risico op veel opwarming door de toename van CO_2 aanzienlijk vergrootte.

De boodschap is duidelijk. Het AR4-rapport uit 2007 had op basis van de beschikbare instrumentele observaties al kunnen concluderen dat de gevoeligheid van het echte klimaat best eens lager zou kunnen zijn dan de ondergrens van 2°C die de AOGCMs lieten zien. In plaats daarvan krikten de AR4-auteurs de ondergrens van de waarschijnlijkheidsrange voor klimaatgevoeligheid zelfs op van $1,5$ tot 2°C en behielden ze een beste schatting van 3°C . Merk op dat de beste schatting uit de paper van Forster en Gregory ($1,6^{\circ}\text{C}$) *buiten* deze waarschijnlijkheidsmarge viel.

⁴⁴Het IPCC erkent niet dat het om een 'fout' gaat omdat het de aanpassing van de PDF uit Forster en Gregory (2006) (maar niet het effect van de aanpassing) meldde en omdat de aanpassing toelaatbaar is als je een subjectieve Bayesiaanse filosofie hanteert (waar binnen kans geen objectieve betekenis heeft). Vanuit wetenschappelijk oogpunt is de keuze echter onverdedigbaar.

Het goede nieuws in AR5

Onderzoekers gaan ervan uit dat aerosolen – vanwege hun afkoelende werking op het klimaat – een deel van de opwarming door broeikasgassen teniet hebben gedaan. Het effect van aerosolen is de grootste onzekerheid bij onze schattingen voor de totale antropogene forcering. Kennis over aerosolen is daarom van cruciaal belang voor schattingen van klimaatgevoeligheid.

Op dit vlak heeft AR5 uitstekend nieuws voor ons in petto: de schattingen voor het afkoelende effect van aerosolen zijn aanzienlijk kleiner dan die in AR4. Dat betekent dan weer dat de gevoeligheid voor broeikasgassen – zowel de evenwichtsklimaatgevoeligheid (ECS) als de overgangsklimaatgevoeligheid (TCR) – lager moeten zijn. De redenering gaat als volgt.

Er heeft ongeveer 0,8°C opwarming plaatsgevonden over de afgelopen anderhalve eeuw. Het IPCC-rapport draagt bewijzen aan dat deze opwarming vrijwel volledig het gevolg is van een verandering in de forcering, voornamelijk antropogeen, en dat interne variabiliteit slechts een kleine rol speelt. Sinds AR4 is de concentratie aan broeikasgassen gestegen en dus de forcering. Er is weinig verandering geweest in de emissies van aerosolen, maar de schatting voor aerosolforcering is flink naar beneden bijgesteld, van $-1,3 \text{ W/m}^2$ in AR4 tot $-0,9 \text{ W/m}^2$ in AR5. Dit is puur een kwestie van wat het IPCC 'verbeterd inzicht' noemt. Als gevolg hiervan is de totale antropogene forcering flink toegenomen, tot $2,29 \text{ W/m}^2$. Dit is ook gerapporteerd in de SPM die stelt (onze nadruk):

De totale antropogene stralingsforcering (RF) voor 2011 ten opzichte van 1750 is $2,29$ [range van $1,13$ tot $3,33$] Wm^{-2} (zie Figuur SPM.5), en die toename verliep na 1970 sneller dan in de decennia ervoor. *De beste schatting voor de totale antropogene stralingsforcering in 2011 is 43% hoger dan de gerapporteerde waarde in AR4 voor het jaar 2005.* Dit wordt veroorzaakt door een blijvende toename in concentraties van de meeste broeikasgasconcentraties in combinatie met verbeterde schattingen voor de stralingsforcering van aerosolen, die duiden op een kleiner afkoelend effect (negatieve stralingsforcering) {8.5}.

Sinds AR4 liggen de schattingen voor de totale antropogene forcering dus 43% hoger terwijl de mondiale temperatuur nagenoeg onveranderlijk is gebleven.⁴⁵ Dezelfde 0,8°C aan opwarming moet nu dus over aanzienlijk meer

⁴⁵De mondiale temperatuur was in 2012 marginaal lager dan in 2007 net als het vijfjarig gemiddelde. Het tienjarig gemiddelde was net iets hoger.

eenheden forcering verdeeld worden. Logischerwijs is de opwarming per eenheid forcering dan 30%⁴⁶ lager. Die opwarming per eenheid forcering is een maat voor klimaatgevoeligheid, in dit geval een die in de buurt komt van de TCR en niet ECS, omdat de toename in forcering heeft plaatsgevonden over de afgelopen 60 tot 70 jaar.

Zoals AR5 ook stelt,⁴⁷ als er een toename in de forcering is over een periode van 70 jaar, dan is de TCR te bepalen aan de hand van de volgende formule:

$$\text{TCR} = \frac{\text{Toename mondiale temperatuur}}{\text{Toename forcering}} \times \text{Forcering voor verdubbeling CO}_2$$

De stijging van de mondiale temperatuur, in de teller, is nagenoeg gelijk aan die in AR4. De verandering in de forcering staat in de noemer: als die groter wordt moet de quotiënt wel kleiner worden. Aangezien de forcering ($F_{2 \times \text{CO}_2}$) die gemoeid is met een (theoretische) verdubbeling van de CO₂-concentratie gelijk is gebleven moet de waarde voor TCR dalen als de forcering stijgt. Men kan vrij eenvoudig berekenen wat de nieuwe beste schattingen voor de forcering in AR5 betekenen voor de TCR. AR5 schat de forcering voor een verdubbeling van de CO₂-concentratie op 3,71 W/m². Dus krijgen we voor TCR:

$$\text{TCR} = \frac{0,8^\circ\text{C}}{2,29 \text{ Wm}^{-2}} \times 3,71 \text{ Wm}^{-2} = 1,30^\circ\text{C}$$

De daaruit volgende waarde voor TCR is slechts 1,3°C – veel lager dan de gemiddelde waarde van tussen de 1,8°C en 1,9°C voor klimaatmodellen.

Als we nog iets dieper het IPCC-rapport induiken dan wordt het nieuws nog beter. De beste schatting die het IPCC geeft voor de totale aerosolforcering is niet volledig gebaseerd op waarnemingen. Het is samengesteld op basis van schattingen van mondiale klimaatmodellen en satellietwaarnemingen. Zes op satellietwaarnemingen gebaseerde studies⁴⁸ met een gemiddelde beste schatting van $-0,78 \text{ W/m}^2$ waren meegenomen in de samengestelde beste schatting voor de totale aerosolforcering van $-0,9 \text{ W/m}^2$ in AR5. Een beste schatting voor aerosolforcering die puur is gebaseerd op satellietwaarnemingen zou dus nog lager uitkomen dan de $-0,9 \text{ W/m}^2$ van AR5.

⁴⁶ $100\% - 100\%/143\% = 30\%$. De verandering in geschatte totale forcering tussen AR4 and AR5 is voornamelijk toe te schrijven aan een verschil in antropogene forcering.

⁴⁷ Sectie 10.8.1.

⁴⁸ Op basis van negen satellietstudies met beste schattingen tussen $-0,09 \text{ W/m}^2$ en $-0,95 \text{ W/m}^2$ zoals te zien in Figuur 7.19 van AR5.

Een ECS-schatting op basis van IPCC-cijfers

We kunnen de robuuste energiebalans-methode uit de Gregory 2002 paper toepassen op de data uit AR5.⁴⁹ We vergelijken de periode 1859–1882 met 1995–2011. Dat zijn de langste periodes in respectievelijk het vroege en late deel van de instrumentele tijdvak die grotendeels vrij waren van grote vulkaanuitbarstingen. Zulke uitbarstingen kunnen van invloed zijn op de schattingen voor klimaatgevoeligheid. Een ander voordeel van de periode 1995–2011 is dat de verschillende datasets voor de warmte-inhoud van de oceanen vrij goed met elkaar overeenkomen.⁵⁰

We gebruiken de aerosolforcing uit AR5 van $-0,78 \text{ W/m}^2$ die gebaseerd is op satellietwaarnemingen. Stoppen we dit allemaal in de formules voor ECS en TCR dan krijgen we een beste schatting van $1,7^\circ\text{C}$ voor ECS en van $1,30^\circ\text{C}$ voor TCR. Zouden we de iets grotere samengestelde aerosolforcing uit AR5 gebruiken (satelliet + klimaatmodellen) dan geeft dat een ECS van $1,76^\circ\text{C}$ en een TCR van $1,36^\circ\text{C}$.

Dus op basis van de meest actuele cijfers uit het IPCC-rapport zelf en gebruik makend van een solide methodiek kom je uit op observationele schattingen voor ECS en TCR die zeer laag zijn: de beste schatting voor ECS van $1,7^\circ\text{C}$ ligt erg dicht bij de ondergrens van $1,5^\circ\text{C}$ en de beste schatting voor TCR van $1,3^\circ\text{C}$ ligt dicht bij de ondergrens in AR5 van 1°C .

De bewijzen voor een lage klimaatgevoeligheid stapelen zich op

De laatste twee jaar zijn er diverse schattingen van ECS gepubliceerd in de peer-reviewed literatuur⁵¹ die gebaseerd zijn op metingen uit de instrumentele periode en op methodes die bevredigend lijken. Deze studies gebruikten doorgaans observationele schattingen voor aerosolforcing. Een van ons (Lewis) was de enige auteur van een van die studies, die meerdere malen aangehaald wordt in AR5. Hij is ook co-auteur van Otto et al. (2013), een opmerkelijke paper, omdat bijna alle vijftien co-auteurs ervan tevens hoofdauteurs of

⁴⁹De HadCRUT4 v2-dataset is gebruikt omdat de andere datasets niet verder terug gaan dan 1880.

⁵⁰Wij zijn conservatiever dan Gregory et al. (2002) en nemen de helft van de waarde ($0,08 \text{ W/m}^2$) die zij gebruikten voor de opname van warmte door de oceanen aan het begin van de periode.

⁵¹Aldrin et al. (2012), Ring et al. (2012), Lewis (2013) en Otto et al. (2013).

coördinerende hoofdauteurs zijn van hoofdstukken in het AR5 WGI-rapport die relevant zijn voor het onderwerp klimaatgevoeligheid.

In zijn eigen studie komt Lewis tot een beste schatting voor klimaatgevoeligheid (ECS) van 1,6°C met een waarschijnlijkheidsrange van 1,3–2,2°C.⁵² De Otto et al.-studie geeft een iets hogere gevoeligheid van 2,0°C⁵³ met een waarschijnlijkheidsrange van 1,5–2,8°C.

Alle studies waarover we het hier hebben waren op tijd gepubliceerd om meegenomen te kunnen worden in AR5. Alle komen met beste schattingen voor klimaatgevoeligheid van tussen de 1,6°C en 2°C. Deze resultaten zijn te zien in Tabel 2, die ook de beste schattingen en ranges geeft voor ECS uit AR4 en AR5, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen de overall assessments en de schattingen gebaseerd op alleen GCMs.

Ring et al. (2012), Aldrin et al. (2012), Lewis (2013) and Otto et al. (2013) zijn alle gebaseerd op observaties die een groot deel van de instrumentele periode bestrijken en ze gebruiken alle zowel meetgegevens over de warmte-inhoud van de oceanen als oppervlaktetemperatuurmetingen. Hun ranges maken ruimte voor natuurlijke interne variabiliteit alsmede andere bronnen van onzekerheid.⁵⁴ Otto et al. pasten de energiebalans-vergelijking toe om ECS en TCR te schatten, gebruik makend van forcering, warmte-opname door de oceanen en de mondiale temperatuur over vier verschillende decennia alsmede de volledige 40-jarige periode 1970–2009. De moderne periodes werden vergeleken met de periode 1860–1879. De forcering was het sterkst tijdens het laatste decennium, 2000–2009, waarin ook sprake was van geringe vulkanische activiteit. Dat decennium levert dus misschien wel de betrouwbaarste schattingen op voor ECS en TCR.

De schattingen daarna op basis van de volledige periode van 40 jaar zijn waarschijnlijk het betrouwbaarst, omdat de kleinere bijdrage van interne variabiliteit over die langere periode gedeeltelijk compenseert voor de zwakkere gemiddelde forcering. Overigens komen de beste schattingen voor ECS die gebaseerd zijn op alleen data uit de jaren '80 of '90 ook goed overeen met de

⁵²Waarbij rekening is gehouden met niet-aerosolforcering en onzekerheden in de gemeten oppervlaktetemperatuur.

⁵³Met data uit het meest recente decennium, 2000–09, wat de betrouwbaarste resultaten zou moeten opleveren. De Otto et al. studie had op een lagere schatting voor klimaatgevoeligheid uit kunnen komen als het een andere dataset had gebruikt voor de warmte-opname door de oceanen. Zie <http://bishophill.squarespace.com/blog/2013/5/19/new-energy-budget-derived-estimates-of-climate-sensitivity-a.html>. De schatting uit Loeb et al. (2012) zou hebben geresulteerd in een beste schatting voor ECS van 1,7°C, of zelfs 1,6°C als de periode 2000–09 wordt verlengd tot 2012.

⁵⁴Met uitzondering van de simpele niet-probabilistische range in Ring et al. (2012).

Een gevoelige kwestie

Tabel 2: Recente op observaties gebaseerde schattingen voor ECS die gebruik maken van observationele schattingen voor aerosolforcing, vergeleken met schattingen van modellen en in IPCC-rapporten

Study	Beste schatting °C	Likely range	
		Van °C	Tot °C
Ring 2012 (4 datasets voor oppervlaktetemperatuur)	1,80	1,4	2,0 ^a
Aldrin 2012 (voornaamste resultaten)	1,76 ^b	1,3	2,5
Lewis 2013 (verkozen voornaamste resultaten ^c)	1,64	1,3	2,2
Otto et al. 2013 (data laatste decennium)	2,00	1,5	2,8
Otto et al. 2013 ('70-'09 data))	1,91	1,3	3,0
Gemiddelde^d	1,79^e	1,3	2,4^f
CMIP3 modellen (in AR4)	3,20	2,1	4,4 ^g
CMIP5 modellen (in AR5)	2,89^h	1,9	4,5ⁱ
IPCC AR4	3,00	2,0	4,5
IPCC AR5	Geen	1,5	4,5

^aEen niet-probabilistische range van vier schattingen. ^b1,53°C bij gebruik van een uniform in 1/ECS prior verdeling, wat objectiever lijkt dan de resultaten op basis van een uniform in ECS prior. ^cZie voetnoot 52. ^dDoor elk van de twee schattingen uit de Otto (2013)-studie even zwaar mee te tellen. ^e1,73°C als we de alternatieve schatting van Aldrin gebruiken op basis van de objectievere prior voor ECS. ^f1,3–2,5°C op basis van alleen de kansverdelingen, dus met uitsluiting van de range in Ring et al. (2012) ^g5–95% statistische range, feitelijk aangepast in AR4 tot de 17–83% waarschijnlijkheidsrange. Het is in feite niet duidelijk of ECS-ranges afkomstig van een ensemble van klimaatmodellen wel een geldige interpretatie hebben in kanstermen. ^hDe CMIP5-modellen hebben een gemiddelde van 3,22°C voor ECS maar een mediaan (beste schatting) van 2,89°C. Bij de in AR4 gebruikte CMIP3-modellen kwamen de mediaan en het gemiddelde voor ECS goed overeen. ⁱ5–95% statistische range, aangepast zoals in AR4.

schattingen voor de gehele periode 1970–2009, wat de robuustheid van de energiebalans-methode aantoont.

De andere drie waren model–observatie vergelijkingsstudies. De gebruikte (eenvoudige) klimaatmodellen werden vele malen gerund met verschillende combinaties van ECS, aerosolforcing en efficiency voor de warmte-opname door de oceanen. Elk van deze drie onbekende parameters werden dan geschat door te analyseren hoe goed de modelsimulaties overeenkwamen met de historische observaties van de oppervlakte- en oceaantemperatuur. De modellen gebruikten temperaturen die gesimuleerd waren per breedtegraad, tenminste op halfrond-niveau en waren daardoor in staat om tot een eigen

schatting voor aerosolforcing te komen.⁵⁵ Otto et al. (2013) daarentegen pasten de totale forcing aan met de op satellietwaarnemingen gebaseerde schattingen voor aerosolen. Alle vier de studies gebruikten derhalve op satellietwaarnemingen gebaseerde schattingen voor aerosolforcing.

Al deze observationele studies met uitzondering van Aldrin et al. (2012) gebruikten objectieve statistische methodes, wat ertoe geleid moet hebben dat de resultaten een goede weerspiegeling zijn van de gebruikte data, in tegenstelling tot vele van de Bayesiaanse observationele studies uit AR4 en AR5. Hoewel Aldrin et al. (2012) een uniform prior voor ECS gebruikten, gaf de studie ook alternatieve resultaten, die gebaseerd zijn op wat een meer objectieve Bayesiaanse prior voor ECS lijkt te zijn.⁵⁶ Dat gaf een beste schatting voor ECS van tussen de 1,5°C en 1,6°C met een waarschijnlijkheidsrange van 1,2–2,0°C.

Warmte in de oceanen

Rond de publicatie van het vijfde IPCC-rapport in september 2013 richtte de media-aandacht zich op wat ook wel de 'hiaat' (pauze, stagnatie) in de opwarming genoemd wordt: het feit dat de mondiale temperatuur al 15 jaar amper stijgt. Diverse verklaringen zijn hiervoor geopperd door de klimaatgemeenschap. Een van de favoriete is dat de warmte-accumulatie in de oceanen gewoon is doorgegaan – of zelfs versnelde sinds ongeveer 2000 – en dat het daardoor niet mogelijk is om te zeggen dat de opwarming van de aarde gestopt is.

De studies die recente data gebruiken voor de warmte-inhoud van de oceanen houden echter rekening met de energie die recent door de oceanen is opgenomen. Van de ECS-schattingen in Otto et al. (2013) bijvoorbeeld, is de schatting die gebaseerd is op het laatste decennium inderdaad hoger dan de schattingen op basis van de jaren '90 of de periode 1970–2009. Hoewel dit

⁵⁵ Aerosolen verspreiden zich niet heel ver van de bronnen van de vervuiling, die voornamelijk op het noordelijk halfrond liggen. Als de temperatuur tenminste op halfmond-niveau wordt opgelost dan kunnen dit soort studies goed afgebakende 'inverse' schattingen geven voor de totale aerosolforcing – doorgaans vergelijkbaar met de schattingen op basis van satellietmetingen. Als echter alleen mondiale temperatuurgegevens worden gebruikt dan is het onmogelijk om schattingen voor aerosolforcing te onderscheiden van schattingen voor klimaatgevoeligheid of de efficiëntie waarmee oceanen warmte opnemen.

⁵⁶ Een uniform in 1/ECS prior, levert een ECS-schatting op die vergelijkbaar is met die van een niet-Bayesiaanse statistische methode.

Een gevoelige kwestie

wellicht tegen het gevoel ingaat is de reden dat – volgens de 0–700m dataset⁵⁷ voor de warmte in de oceanen die gebruikt werd (en die ook werd gebruikt in AR5) – de warmte-opname door de oceanen veel hoger was in het eerste decennium van deze eeuw dan in het decennium daarvoor.

Andere datasets voor de warmte-inhoud van de oceanen en schattingen voor de stralingsonbalans met satellieten laten geen versnelling in de warmte-opname zien in de jaren '00. Als Otto et al. (2013) die datasets hadden gebruikt, dan was de ECS-schatting voor de jaren '00 uitgekomen op ergens tussen de 1,7 en 1,9°C, afhankelijk van welke specifieke dataset je zou gebruiken.

Dus deze schattingen voor ECS houden volledig rekening met de er-gaat-meer-warmte-in-de-oceanen-verklaring voor de recente stagnatie van de opwarming: hoewel meer warmte naar de diepe oceaan een verklaring zou kunnen zijn voor de stagnatie van de opwarming aan het oppervlak verandert het de schattingen voor ECS niet noemenswaardig. Deze zijn nog altijd aanzienlijk lager dan de beste schatting van 3°C die de laatste dertig jaar het meest gangbaar was. De stagnatie verlaagt wel de schattingen voor TCR, dat gezien wordt als een beleidsrelevantere parameter.

Beste schatting

Om de 'beste observationele' schatting te bepalen voor ECS kunnen we redelijkerwijs eenvoudigweg het gemiddelde nemen van de verschillende observationele schattingen in Tabel 2, omdat al deze studies vergelijkbare waarnemingen gebruiken. Dat levert een beste schatting op voor ECS van 1,75°C en een waarschijnlijkheidsrange van ongeveer 1,3–2,5°C.⁵⁸ Een beste schatting van 1,75°C wordt ondersteund door de energiebalans-schatting op basis van de data uit AR5 die we hierboven besproken hebben, zelfs als je niet de puur observationele schattingen voor aerosolen gebruikt maar de samengestelde waarde die AR5 presenteerde.

Als we echter rekening houden met het feit dat er onzekerheid is als gevolg van interne variabiliteit, dat meet- en modelfouten groter kunnen zijn dan nu is aangenomen, en dat die onzekerheden vooral van invloed zijn op de bovenkant van de range, dan komen we tot een conservatieve schatting voor de

⁵⁷Een actualisatie van Domingues et al. (2008).

⁵⁸Gebaseerd op de beste schatting in Aldrin et al. (2012) die gebruik maakt van de meer objectieve uniform in 1/ECS prior, enige afronding en alleen gebruik makend van de probabilistische ranges.

waarschijnlijkheidsrange van 1,25–3,0°C. Die range omsluit volledig de 17–83% waarschijnlijkheidsrange van de geciteerde observationele schattingen.

Vergelijk die range nu eens met de beste schatting en de range in AR4 en AR5 (zie ook Tabel 1 voor een langer historisch overzicht van de range). De 'beste observationele' schatting van 1,75°C is meer dan 40% lager dan de beste schatting van 3°C in AR4. Minstens zo belangrijk is dat de bovengrens van de observationele waarschijnlijkheidsrange voor ECS van 3.0°C een derde lager is dan die in AR5 (4,5°C), zelfs als we de observationele range aan de bovenkant wijder maken dan een simpele middeling van de ranges van de observationele schattingen suggereert.

Zwakke studies vertroebelen het zicht

De vier studies die in Tabel 2 zijn opgenomen vertegenwoordigen natuurlijk maar één categorie van bewijzen voor de waarde van ECS in AR5. Figuur 1 in Box 12.2 in AR5, hier beneden getoond als Figuur 2, laat de ranges van verschillende type studies zien. Door alleen naar de Figuur te kijken lijkt het logisch waarom AR5 geen beste schatting voor ECS gaf: de schattingen voor ECS zijn niet geclusterd rond één waarde en vele schattingen bevinden zich buiten de 5–95% onzekerheidsmarge van andere studies. De auteurs van AR5 wilden mogelijk geen oordeel vellen over welke studies de betere zijn of ze wilden niet kiezen tussen observationele en model-gebaseerde schattingen, maar naar onze mening gaat het in een assessment juist daarom: kennis van deskundigen gebruiken om verschillende bewijsgronden tegen elkaar af te wegen. Hieronder geven we weldoordachte argumenten voor een andere assessment dan die van AR5.

We zullen daarom de schattingen in Figuur 2 in enig detail bespreken, waarbij we laten zien waarom weinig waarde te hechten is aan alle schattingen die inconsistent zijn met de waarschijnlijkheidsranges voor de 'beste observationele' studies in Tabel 2, hetzij omdat er sprake is van ernstige tekortkomingen hetzij omdat ze een methode gebruiken waar AR5 zelf vraagtekens bij zet. We zullen in verband hiermee de conclusie accepteren in AR5⁵⁹ dat schattingen gebaseerd op:

- het klimaat in het (verre) verleden dat afwijkt van het huidige klimaat

⁵⁹Sectie 12.5.3.

Een gevoelige kwestie

- tijdschalen die afwijken van de tijdschaal die relevant is voor het stabiliseren van het klimaat (bijv. het effect van vulkaanuitbarstingen op het klimaat)
- andere forceringen dan broeikasgassen (bijv. vulkaanuitbarstingen of zonforcering)

kunnen afwijken van de klimaatgevoeligheid gebaseerd op klimaatfeedbacks in het huidige klimaat. Dus zo lang het gaat om observationele schattingen van ECS zijn wij het eens met de AR5-auteurs dat we de meeste waarde zouden moeten hechten aan instrumentele schattingen gedurende een groot deel van de periode of de gehele periode sinds 1850.

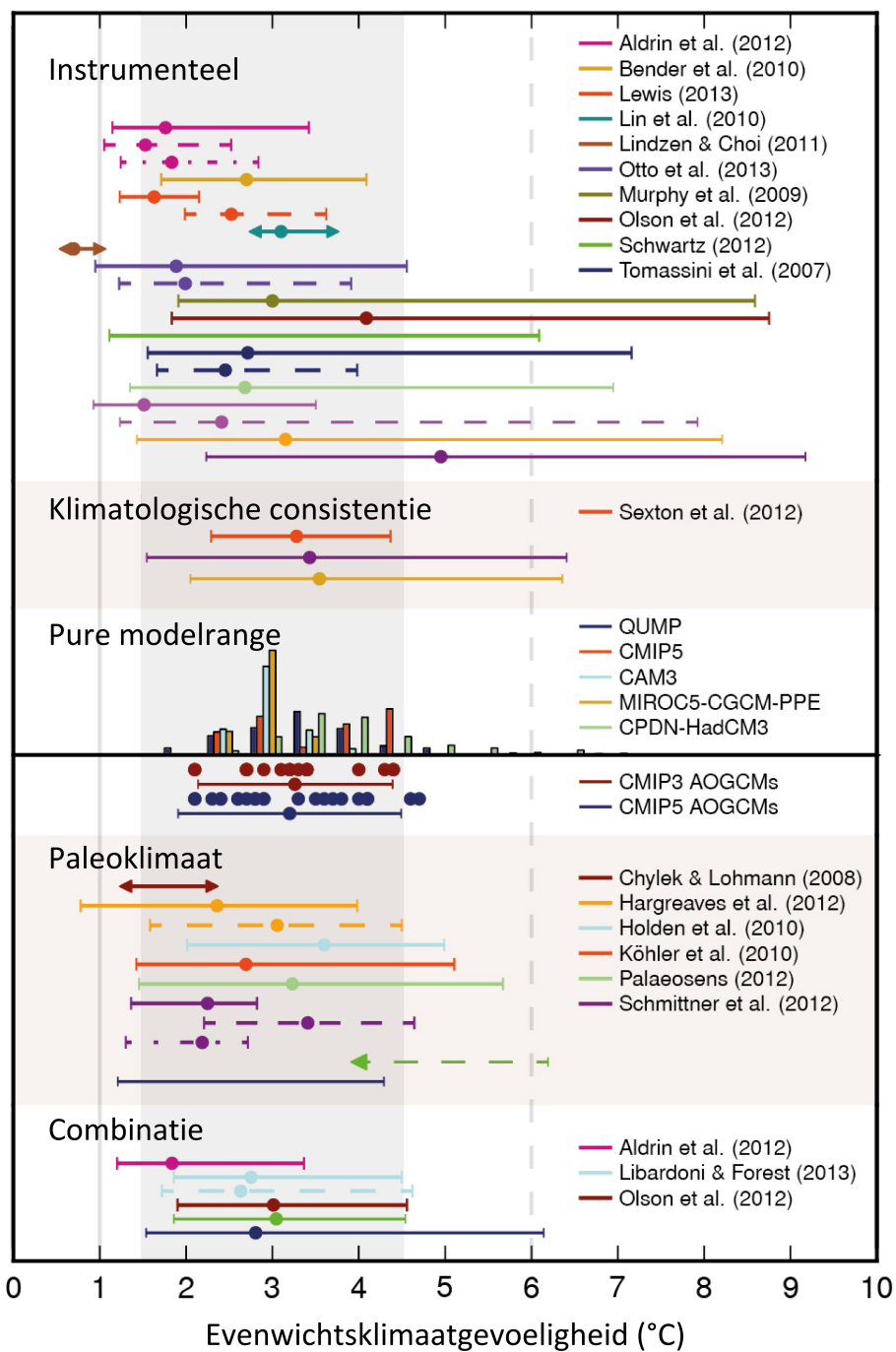
Instrumentele schattingen

De ongelabelde ranges in Figuur 2 verwijzen naar studies in AR4. Al die studies hebben we al besproken en hebben we op één na te licht bevonden. De uitzondering is de range zoals die oorspronkelijk gepubliceerd werd in Forster en Gregory (2006) (de ongelabelde paarse streep vierde van onder in de categorie 'instrumentele schattingen' in Figuur 2) en die goed overeenkomt met de range van Lewis (2013) in Tabel 2.

Over de gelabelde ranges voor instrumentele schattingen die niet zijn opgenomen in Tabel 2 kunnen we het volgende zeggen:⁶⁰ Bender et al. (2010) is gebaseerd op de respons op vulkanische forcering. De studies van Lindzen en Choi (2011) en Murphy et al. (2009) zijn gebaseerd op kortetermijnvariaties in de stralingsflux bovenin de atmosfeer gemeten vanuit een satelliet.⁶¹ Beide

⁶⁰ Alleen de doorlopende lijnen voor Aldrin et al. (2012) en Lewis (2013) in Figuur 2, die de voornaamste resultaten weergeven, zijn opgenomen in Tabel 2 (voor Lewis (2013) na rekening te hebben gehouden met niet-aerosolforcering en onzekerheden in de gemeten temperaturen); de andere ranges hebben een andere basis. De hogere gestippelde range voor Lewis (2013) is gebaseerd op een kortere periode en op een minder bevredigende methode, overeenkomstig Forest et al. (2006), en zou buiten beschouwing gelaten moeten worden aangezien het bekend is dat de parameters waarmee de beste fit wordt verkregen overdreven gesimuleerde opwarming geven. Voor Aldrin et al. (2012) geldt dat de lagere gestreepte range degene is die de uniform-in-1/ECS-prior gebruikt waarover we het eerder hadden, terwijl de deels gestippelde lijn genegeerd zou moeten worden vanwege een opwaartse bias door een overdreven negatieve aerosolforcerings-prior.

⁶¹ Een grote onzekerheid in dit soort studies is dat het lastig is om onderscheid te maken tussen de effecten van wolkenveranderingen als gevolg van temperatuurveranderingen (en dus feedbacks) en spontane wolkenveranderingen (interne variabiliteit die hier opereert als forcering). Lindzen en Choi (2011) proberen dit onderscheid te maken door een regressie met tijdsverschil te doen; hun resultaten geven aan dat ECS zeer laag is. Dit is een slimme aanpak maar het is nog niet duidelijk hoe robuust hun resultaten zijn. Murphy et al. (2009) gebruiken normale regressie (zonder tijdsverschil) en komen tot hoge schattingen voor ECS die slecht afgebakend zijn. Forster en Gregory (2006) verkregen een lage (1.6°C), goed-afgebakende schatting voor ECS na regressie op bijna dezelfde data die Murphy et al. gebruikten (zie voetnoot 43 voor een mogelijk verklaring van dit verschil).



Figuur 2: Reproductie van Figuur 1 in Box 12.2 in AR5

De balken geven de 5–95% onzekerheidsranges weer voor ECS, waarbij de beste schattingen gemarkeerd zijn met stippen. De Figuur vermeldt ook de ECS-waardes van alle gebruikte CMIP3- and CMIP5-modellen. Ranges zonder label verwijzen naar studies die in AR4 geciteerd worden.

Een gevoelige kwestie

methodes worden in AR5 betiteld als een ontoereikende manier om ECS te bepalen.⁶²

De overigen studies waar AR5 naar verwijst, Lin et al. (2010), Olson et al. (2012), Schwartz (2012) en Tomassini et al. (2007) hebben alle tekortkomingen die hun schattingen van ECS onbetrouwbaar maken.⁶³ Die tekortkomingen zetten we uiteen in de appendix.

Klimatologische consistentie

Climatological constraint-studies (klimatologische consistentie) geven aan hoe goed GCMs in staat zijn om verschillende variabelen van het recente klimaat te simuleren. Dit gebeurt door de modellen te verstoren om zo verschillend modelgedrag en dus ook verschillende ECS-waarden te genereren. De aanname is dat zo'n exercitie het mogelijk maakt om af te leiden welke range voor ECS het meest waarschijnlijk is. De methode veronderstelt dat een GCM, door parameters te verstoren, in staat zal zijn om alle combinaties van aerosolforcing en ECS-waarden te verkennen. Maar zelfs als dat zo is, is het onduidelijk of vergelijkingen met waarnemingen van deelaspecten van het recente klimaat, in plaats van met waarnemingen van *klimaatverandering*, betrouwbare ranges voor ECS kan opleveren.

De Sexton et al. (2012)-studie verstoort parameters in het HadCM3-klimaatmodel en genereerde op die manier verschillende ECS-waarden.⁶⁴ Vanwege structurele starheden in het HadCM3-model lukt het alleen om lage waarden voor ECS te simuleren als de aerosolforcing sterk negatieve waarden⁶⁵ aanneemt. De waarnemingen sluiten die combinatie echter uit. De Sexton-studie was niet in staat om de combinatie lage tot gematigde waarden voor ECS en lage tot gematigd negatieve waarden voor de aerosolforcing – de combinatie die het meest aannemelijk is volgens de waarnemingen – te onderzoeken. Het is dus niet verrassend dat die studie lage waarden voor ECS uitsluit. De

⁶² Secties 10.8.2.2 en 10.8.2.3 in AR5 geven een gedetailleerd overzicht van de redenen om de bruikbaarheid van deze schattingen in twijfel te trekken.

⁶³ In het geval van Schwartz (2012) beperkt de kritiek zich tot het deel van de range voor ECS boven de 3°C.

⁶⁴ Omdat HadCM3 zo star is dat het geen lage ECS-waarden kan bereiken ongeacht hoe de parameters worden ingesteld, wordt er nabootsing gebruikt om te extrapoleren naar waarden beneden de 2°C.

⁶⁵ Zie Box 1 in het document dat beschikbaar is op http://niclewis.files.wordpress.com/2013/09/metoffice_response2g.pdf. De Sexton et al. (2012)-studie is identiek aan de eerste fases van de Harris et al. (2013)-studie die het bespreekt, en de Harris et al. bijna definitieve posterior-regio in Figure B.1 komt overeen met de uiteindelijke resultaten van de Sexton et al. (2012)-studie.

ECS-schattingen in de Sexton-studie weerspiegelen voornamelijk de eigenschappen van het HadCM3-model en niet die van de observaties.

De twee ongelabelde AR4-studies gebruiken, hoewel ze in details verschillen van Sexton et al. (2012), eveneens het HadCM3-model. Die zullen daarom ook niet in staat zijn geweest de combinatie van lage tot gematigde waarden voor ECS en lage tot gematigd negatieve waarden voor de aerosolforcing af te tasten. Het lijkt er bovendien op dat die studies ECS-waarden beneden de 2°C nauwelijks beproefd hebben. Het is te verwachten dat deze twee beperkingen in de twee AR4-studies hebben geleid tot een flinke opwaartse bias in de schatting voor ECS.

Samenvattend, aangezien de *climatological constraint*-studies vooral een afspiegeling zijn van de eigenschappen van de modellen en maar voor een klein deel van de observaties, zijn ze van weinig tot geen waarde voor de ECS-schattingen.

Pure modelrange

Omdat het conflict tussen observationele en AOGCM-schattingen van ECS van cruciaal belang is en AR5 feedbackanalyse (de analyse van feedbacks zoals gesimuleerd door AOGCMs) nog eens opvoert als een additionele vorm van bewijs, is het gepast om de feedbacks en ECS in klimaatmodellen redelijk gedetailleerd te bespreken.

Het is bijna algemeen geaccepteerd dat de evenwichtsoverwarming door een verdubbeling van de CO₂-concentratie iets meer dan 1°C is. Die temperatuurstijging is nodig om de aarde als zwarte straler (*Planck radiation*) krachtiger te laten uitstralen ter compensatie van de toegenomen CO₂-forcing. Waarom hebben klimaatmodellen dan een gemiddelde ECS van 3°C? Dat komt door de zogenaamde 'positieve feedbacks' die het gevolg zijn van de stijging van de oppervlaktetemperatuur. Positieve feedbacks versterken het opwarmende effect van CO₂. De voornaamste feedbacks in de modellen zijn waterdamp, de verticale temperatuurgradiënt (*lapse rate*), wolken en albedo.

De waterdampfeedback is sterk positief: een warmere atmosfeer kan meer waterdamp bevatten en waterdamp is zelf ook een krachtig broeikasgas. De waterdampfeedback wordt gedeeltelijk teniet gedaan door de eraan gekoppelde negatieve verticale temperatuurgradiënt: als de lucht vochtiger is, dan daalt de temperatuur langzamer met de hoogte.

Een gevoelige kwestie

De aarde reflecteert minder zonlicht als sneeuw- en zeeijsbedekking afnemen door de opwarming, waardoor de albedofeedback positief is, hoewel maar licht. Alles bij elkaar impliceren deze drie feedbacks samen met de verandering in Planck-straling een ECS van ongeveer 2°C.⁶⁶ ECS-waarden van boven de 2°C in de modellen zijn voornamelijk het gevolg van positieve wolkenfeedbacks en aanpassingen, waarbij niet-lineaire effecten en/of afhankelijkheid van de toestand van het klimaat in sommige gevallen ook een behoorlijke impact hebben.

Maar de simulatie van wolken is al jaren een hoofdpijndossier voor de modelleers. Het blijkt zeer lastig te zijn om wolken te simuleren, laat staan om te voorspellen hoe de wolkenbedekking in de toekomst zal veranderen. Observatoire bewijzen voor een positieve feedback in plaats van negatieve zijn op z'n zachtst gezegd zwak.⁶⁷ Maar zelfs de observationele bewijzen voor de gemodelleerde positieve waterdampfeedback zijn op de tijdschaal die relevant is voor klimaat (dertig jaar) nog tamelijk zwak.⁶⁸

Er is geen knop voor klimaatgevoeligheid als zodanig in mondiale klimaatmodellen, maar er zijn diverse instelbare parameters die van invloed zijn op de simulatie van processen (zoals bijv. processen die van belang zijn bij wolkenvorming) die de GCMs niet direct berekenen op basis van de fysica. De modelklimaatgevoeligheid tentoongespreid door modellen die een realistisch klimaat simuleren en realistische veranderingen in klimaatvariabelen in de instrumentele periode, wordt geacht representatief te zijn voor de klimaatgevoeligheid van het werkelijke klimaat. Er is echter geen wetenschappelijke grond voor deze aanname. Een ervaren team van klimaatmodelleers stelde vast⁶⁹ dat verschillende combinaties van modelparameters realistische simulaties van het huidige klimaat kunnen opleveren, maar met heel verschillende waarden voor klimaatgevoeligheid. Zij erkennen ook dat een goede match tussen de modelsimulaties en de waargenomen veranderingen in de mondiale temperatuur in de twintigste eeuw – een zeer gebruikelijke test, in het AR4-rapport goedgekeurd als een manier om de *skill* van modellen te bewijzen – eigenlijk heel weinig bewijst. Modellen met een klimaatgevoeligheid van 3°C kunnen ongeveer de historische mondiale temperatuur nabootsen, maar alleen door een aerosolforcing te gebruiken die hoger is dan de waarnemingen nu aangeven, door positieve forceringen te onderschatten, door te veel warmte in

⁶⁶Soden en Held (2006); Tabel 9.5 in AR5. ECS is geschat via $F_{2 \times CO_2} / \alpha$ in overeenstemming met sectie 10.8.1 in AR5, maar in dit geval met alleen de Planck-, waterdamp-, verticale temperatuurgradiënt- en albedofeedbacks meegenomen in α ; Voor $F_{2 \times CO_2}$ is 3,71 W/m² genomen.

⁶⁷Sectie 7.2.5.7 in AR5.

⁶⁸VonderHaar et al. (2012).

⁶⁹Forest et al. (2008).

de oceanen te stoppen en/of door het optreden van niet-lineaire effecten of door sterke afhankelijkheid van de toestand van het klimaat.⁷⁰

Als de belangrijke feedbacks in AOGCMs in grote lijnen met elkaar overeen zouden komen zowel qua teken als – laten we zeggen binnen een factor twee – qua grootte, en als de ruimtelijke afhankelijkheid van de feedbacks, en afhankelijkheid van niet-lineaire effecten en van de toestand van het klimaat tussen verschillende AOGCMs kwalitatief vergelijkbaar zouden zijn, dan zou het wellicht redelijk zijn om grote waarde te hechten aan de klimaatgevoeligheid op basis van klimaatmodellen. Hoewel de ontwikkeling van de modellen continu gevoed wordt met verschillende observaties, is dat echter niet het geval. Wij vinden dus dat schattingen voor klimaatgevoeligheid gebaseerd op AOGCMs buiten beschouwing gelaten moeten worden. Dat geldt dus voor alle schattingen in de sectie 'Raw model range'. Aangezien ze nauwelijks gestoeld zijn op observaties, is het onduidelijk in hoeverre de pure modelwaarden voor ECS überhaupt als wetenschappelijk bewijs in aanmerking komen.

Ook gerelateerd bewijs voor ECS gebaseerd op analyses van feedbacks in modellen (besproken in Hoofdstuk 12 van AR5, maar niet getoond in Figuur 1 van Box 12.2) moet terzijde geschoven worden enerzijds omdat niet duidelijk is dat alle belangrijke feedbackprocessen meegenomen worden in de modellen en anderzijds omdat de belangrijkste feedback – die van de wolken – nog zeer slecht in de modellen zit.

Paleoklimaat

Paleoklimaatstudies gebaseerd op proxies schatten klimaatgevoeligheid door gebruik te maken van meetreeksen uit het wat verdere verleden (het laatste millennium, het Laatste Glaciale Maximum of zelfs miljoenen jaren terug). Het vierde IPCC-rapport uit 2007 concludeerde echter (Box 10.2) dat de onzekerheden in studies gebaseerd op het Laatste Glaciale Maximum te groot waren om als primair bewijs te dienen voor ECS, en de enige paleoschatting die AR4 gaf, gebaseerd op een proxy-studie over het laatste millennium, leverde een zeer zwak afgebakende range voor ECS op.⁷¹ Resultaten van andere millenniumstudies werden niet opgenomen in Figuur 1 van Box 12.2.

⁷⁰Dit is de implicatie van Otto (2013) op basis van de forcering uit AR5, en de beste schattingen voor de warmte-opname door de oceanen.

⁷¹Hegerl et al. (2006). Zoals hierboven besproken gebruikte deze studie een ongeschikte uniform prior voor ECS, met een bias naar hogere waarden voor ECS tot gevolg.

Een gevoelige kwestie

AR5 bespreekt paleoklimaatschattingen ook. Het schrijft over een recente review-artikel:⁷² 'Ze schatten, voornamelijk op basis van de laatste 800.000 jaar, een 95% range van 1,1°C–7,0°C. De onzekerheden in [ECS] zijn waarschijnlijk echter nog groter, bijvoorbeeld omdat feedbacks anders kunnen zijn in verschillende klimaattoestanden.' Met zulke wijde onzekerheidsmarges leveren paleoklimaatschattingen voor ECS nauwelijks enige informatie op.

AR5 is dus van mening dat paleoklimaatschattingen voor ECS, gebaseerd op klimaattoestanden uit het verleden die heel anders dan nu waren, wellicht niet representatief zijn voor het huidige klimaat en dat zulke schattingen ECS minder goed afbakenen dan de instrumentele schattingen dat doen. Dat is ongeveer wat AR4 ook al zei. Het beschouwde paleoklimaatschattingen veel meer als bruikbare aanvullende informatie dan als primair bewijs voor de hoogte van ECS. Er kan dus weinig waarde gehecht worden aan de paleoklimaatschattingen voor ECS.

Combinatie

Combinatie-studies zijn schattingen die tot stand komen door informatie uit verschillende methoden te combineren. Van de gelabelde studies in AR5 wijkt de ECS-schatting uit Aldrin et al. (2012) weinig af van de instrumentele schatting in dezelfde studie. De Libardoni en Forest (2013) en Olson et al. (2012) papers en de ongelabelde AR4-studies hebben ernstige tekortkomingen en de gecombineerde schattingen erin van ECS zijn onbevredigend (see Appendix).

Instrumentele schattingen zijn superieur

Samenvattend zijn wij van mening dat van de drie voornaamste methodes om ECS te schatten (instrumentele observaties, paleoklimaat op basis van proxy's en GCM-simulaties/feedbackanalyse), de instrumentele schattingen – met name die schattingen die gebaseerd zijn op een aanzienlijk deel van de instrumentele periode doorlopend tot in de 21e eeuw – verreweg de beste zijn. Deze observationele schattingen geven de beste indruk hoe ons huidige klimaat in feite heeft gereageerd op de toename van broeikasgassen.

⁷²Paleosens Members (2012), besproken in sectie 10.8.2.4 in AR5.

Onze mening over welk type observationele studie nu het betrouwbaarst is om ECS te schatten wordt gesteund door wat Hoofdstuk 12 van AR5 erover heeft te zeggen.⁷³

De evenwichtsklimaatgevoeligheid blijft zonder twijfel een sleutelbegrip, dat nuttig is om veranderingen in broeikasgassen of andere forceringen te relateren aan veranderingen in de mondiale temperatuur. Maar de bovenstaande voorbehouden impliceren dat schattingen voor ECS op basis van het klimaat in het (verre) verleden dat afwijkt van het huidige klimaat, schattingen op basis van tijdschalen die afwijken van de tijdschaal die relevant is voor het stabiliseren van het klimaat (bijv. het effect van vulkaanuitbarstingen) of schattingen op basis van andere forceringen dan broeikasgassen (bijv. ruimtelijk ongelijk verdeelde veranderingen in landgebruik, vulkaanuitbarstingen of zon-forcering) kunnen verschillen van de klimaatgevoeligheid op basis van feedbacks in ons huidige klimaat, en deze waarde kan op haar beurt – op tijdschalen van millennia – weer afwijken van de gevoeligheid van een Aards klimaat dat veel warmer is dan dat van tegenwoordig.

We hebben bovendien geconstateerd dat alle observationele schattingen in AR5 voor de instrumentele periode, met uitzondering van de observationele studies die we in Tabel 2 vermelden en die beste schattingen hebben in de range 1,6–2°C, flinke tekortkomingen hebben die hun schattingen onbetrouwbaar maken. Als een studie immers schattingen voor de forceringen en de warmte-opname gebruikt die overeenkomen met die in AR5, dan zijn ECS-schattingen van die orde van grootte op basis van behoud van energie onvermijdelijk het gevolg.⁷⁴

Volgens onze lezing van AR5 zijn de IPCC-onderzoekers het grotendeels eens met onze analyse over het observationele bewijs voor ECS.⁷⁵ Zij zaten echter opgezet met de ECS-range op basis van de CMIP5-modellen en de bewijzen voor ECS die daarvan afgeleid zijn plus de op observaties gebaseerde schattingen die wij bekritisieren. De discrepantie tussen de ECS-schattingen op basis van de nieuwe observationele studies en de modelschattingen was

⁷³Section 12.5.3.

⁷⁴Door vergelijking met de resultaten van de energiebalans-analyses. De enige uitzondering zou zijn wanneer een studie haar eigen goed afgebakende inverse schatting van de onzekere aerosolforcering zou geven, die veel groter is dan de beste schatting daarvan in AR5. Geen van de instrumentele studies deed dat.

⁷⁵De Technical Summary in AR5 rechtvaardigt het verlagen van de ondergrens voor de waarschijnlijkheidsrange van ECS met het bewijs uit nieuwe studies, die op basis van langere tijdreeksen tot een beste fit komen met de waargenomen temperatuur van de oceanen en de atmosfeer met ECS-waarden die aan de onderkant van de range liggen.

Een gevoelige kwestie

naar onze mening waarschijnlijk de belangrijkste reden voor de IPCC-auteurs om deze keer niet een beste schatting voor ECS te geven.

Het conflict tussen de observationele en modelschattingen zadelde de IPCC-auteurs op met een dilemma. Grote delen van het IPCC-rapport zijn gebouwd rond de simulaties van de klimaatmodellen. Vrijwel alle projecties van het toekomstige klimaat zijn erop gebaseerd en een compleet hoofdstuk is gewijd aan de performance van modellen.

In de SPM stellen dat de beste observationele schattingen voor klimaatgevoeligheid nu duiden op een waarde van tussen de 1,5 en 2°C zou neerkomen op een bekentenis dat het merendeel van de CMIP5-modellen ECS op zijn minst flink overschatten. Aangezien de verwachte opwarming aan het eind van deze eeuw in GCMs sterk gekoppeld is aan de ECS van modellen,⁷⁶ zou dat betekenen dat beleidsmakers niet te veel waarde zouden moeten hechten aan de toekomstverwachtingen van de modellen.

Het lijkt erop dat de IPCC-auteurs besloten hebben om dit dilemma op te lossen door de ondergrens voor ECS te verlagen tot 1,5°C en de beste schatting volledig weg te laten. Door dit te doen gaven ze aan rekening te houden met de nieuwe lagere schattingen die recent zijn gepubliceerd in de literatuur. Nu staat het IPCC-onderzoekers uiteraard volledig vrij om tot een andere conclusie te komen dan wij met betrekking tot de vraag hoeveel gewicht toegekend zou moeten worden aan de modelschattingen voor ECS. Zij lieten echter na om deze kwestie duidelijk te bespreken in de SPM, waardoor ze beleidsmakers in het ongewisse lieten.

Het IPCC had kunnen zeggen: 'er zijn twee belangrijke methodes om ECS te schatten en één – gebaseerd op observaties en gebruik makend van de beste data en een degelijke methodiek – wijst op een meest waarschijnlijke waarde voor ECS van 2°C of iets minder. De ander – gebaseerd op modellen – duidt op een waarde van ongeveer 3°C.' Dat zou een stap in de goede richting geweest zijn omdat beleidsmakers er dan tenminste op attent waren gemaakt dat modelschattingen flink beginnen af te wijken van de observationele schattingen.

Een van ons (Lewis) adviseerde de AR5-auteurs in een review commentaar om beste schattingen te geven voor zowel de instrumentele als de op modellen gebaseerde methode:

⁷⁶Zie ook voetnoot 4.

Het is erg belangrijk om de range voor ECS geschat met observaties – in het bijzonder de instrumentele observaties, die naast het feit dat ze accurater zijn ook betrekking hebben op het huidige klimaat – te scheiden van de range op basis van AOGCM-simulaties. AOGCMs kunnen, direct of indirect, forcing of andere input gebruiken die niet consistent is met het beste observationele bewijs van dit moment. Dat is vooral van belang met betrekking tot aerosolforcing en ook met betrekking tot de effectieve verticale diffusie in de oceanen. Een van deze of beide factoren kunnen flink overschat worden in AOGCMs, wat leidt tot een flinke overschatting van de ECS terwijl de modellen toch de recente opwarming realistisch weten te reproduceren. De mondiale klimaatmodellen van NASA GISS gaan er nu (2010) bijvoorbeeld vanuit dat de totale aerosolforcing $-2,42 \text{ W/m}^2$ is (<http://data.giss.nasa.gov/modelforce/RadF.txt>), meer dan drie keer zoveel als de beste puur observationele schatting in AR5 van $-0,73 \text{ W/m}^2$.

Merk op dat dit commentaar geschreven was in november 2012 tijdens de review van de Second Order Draft. Sindsdien zijn er enkele andere studies (Ring et al. 2012; Lewis 2013; Otto et al. 2013) gepubliceerd en het is nu mogelijk om een veel beter afgebakende range te geven voor ECS van $1,25-3,0^\circ\text{C}$ gebaseerd op (maar conservatiever dan) de schattingen die zijn weergegeven in Tabel 2. Het IPCC had aanvullend een 'beste observationele' schatting van $1,75^\circ\text{C}$ of (door rekening te houden met hogere schattingen uit andere instrumentele studies) van 2°C . Als het IPCC dat had gedaan – wat in overeenstemming zou zijn geweest met de beste wetenschappelijke kennis van dit moment – dan zou dat door alle media in de wereld opgepikt zijn als een van de, zo niet de belangrijkste conclusie van het rapport. En terecht.

AR5 schiet tekort

AR5 stelt in een voetnoot in de SPM dat het dit keer geen beste schatting voor ECS kan geven vanwege 'een gebrek aan overeenstemming over de waardes tussen verschillende bewijzen en studies'. Zo'n belangrijke beslissing slechts uitleggen in een voetnoot is onbevredigend. Beleidsmakers hadden een volledige uitleg moeten krijgen.

Meerdere onderliggende hoofdstukken behandelen deze kwestie: de Technical Summary en de hoofdstukken 9, 10 en 12. Op pagina 84 van de Technical Summary wordt het verlagen van de ondergrens van de waarschijnlijkheidsrange voor ECS besproken (onze nadruk):

Een gevoelige kwestie

Deze verandering weerspiegelt het bewijs van nieuwe studies op basis van de langere tijdreeksen van temperatuurmetingen in de atmosfeer en de oceanen. *Deze studies suggereren dat ECS-waarden aan de onderkant van de waarschijnlijkheidsrange het beste overeenkomen met de waargenomen opwarming van het oppervlak en de oceanen.* Merk op dat deze studies niet puur observationeel zijn omdat voor de schatting voor de respons op de stralingsforcering een model nodig is. Daar komt bij dat de onzekerheid in de warmte-opname door de oceanen aanzienlijk blijft.

Hier geeft AR5 vrij openlijk toe dat deze nieuwe (observationele) studies beste schattingen hebben die dichtbij de ondergrens van 1,5°C liggen. De probabilistische ECS-ranges van de nieuwe studies houden rekening met de onzekerheid in de warmte-opname van de oceanen en AR5 schat die onzekerheid trouwens veel kleiner in dan de onzekerheid in aerosolforcering.

Toen de goedgekeurde SPM eind september 2013 werd gepubliceerd bleek ook het onderliggende rapport vrijwel volledig te zwijgen over het ontbreken van een beste schatting voor ECS. De sectie over klimaatgevoeligheid in hoofdstuk 10 eindigt met de volgende statement:

Schattingen voor de evenwichtsklimaatgevoeligheid (ECS) gebaseerd op verschillende en deels onafhankelijke bewijzen van waargenomen klimaatverandering, waaronder schattingen die gebruik maken van langere meetreeksen voor de oppervlaktetemperatuur en nieuw paleoklimatologisch bewijs, duiden erop dat we met veel vertrouwen (*high confidence*) kunnen stellen dat het extreem onwaarschijnlijk is dat ECS kleiner is dan 1°C en dat we er enig vertrouwen (*medium confidence*) in hebben dat ECS waarschijnlijk tussen 1,5°C en 4,5°C ligt en zeer onwaarschijnlijk groter is dan 6°C. Dat is een aanvulling op de evaluatie in hoofdstuk 9 en bevestigt de algehele evaluatie in hoofdstuk 12 met als conclusie dat alle bewijsgronden vertrouwen (*high confidence*) geven in de waarschijnlijkheidsrange van 1,5°C tot 4,5°C. Feedbacks van het aardse systeem kunnen op zeer lange termijn leiden tot een andere, waarschijnlijk grotere opwarming dan ECS impliceert.

Een beste schatting voor ECS werd opnieuw niet eens genoemd. Waar je het ontbreken van een gedetailleerde uitleg over het niet geven van een beste schatting voor ECS in de SPM nog zou kunnen verantwoorden met een gebrek aan ruimte, is de stilte erover in de relevante hoofdstukken (10 en 12), waar je een uitgebreide bespreking had mogen verwachten, des te verrassender.

In het definitieve rapport dat eind januari 2014 werd gepubliceerd was er echter een paragraaf toegevoegd aan de Technical Summary die bespreekt waarom

er geen beste schatting voor ECS kan worden gegeven.⁷⁷ Dat is nogal verrassend. Aanpassingen in dit late stadium zijn bedoeld om fouten te corrigeren.⁷⁸ De paragraaf met uitleg over het ontbreken van een beste schatting voor ECS beschrijft echter niet de correctie van een fout maar bevat geheel nieuwe tekst. De nieuwe paragraaf, die is vrijgegeven lang nadat landen de SPM goedkeurden, zegt het volgende:

In tegenstelling tot AR4 is ditmaal geen beste schatting voor ECS gegeven vanwege een gebrek aan overeenstemming over de beste schatting tussen verschillende bewijzen en studies en een beter begrip van de onzekerheden in de schattingen gebaseerd op de waargenomen opwarming. Klimaatmodellen met ECS-waarden aan de bovenkant van de waarschijnlijkheidsrange komen zeer goed overeen met het waargenomen klimaat, terwijl schattingen op basis van waargenomen klimaatverandering de beste overeenkomst geven met de waargenomen opwarming van land en oceanen voor ECS-waarden aan de onderkant van de waarschijnlijkheidsrange. Bij observationele schattingen is de meest waarschijnlijke waarde gevoelig voor observationele en modelonzekerheden, interne klimaatvariabiliteit en voor aannames over de prior-distributie voor ECS. Bovendien zijn 'beste schatting' en 'meest waarschijnlijke waarde' op verschillende manieren gedefinieerd in diverse studies.

Hier geeft AR5 dus eindelijk enige aanvullende uitleg. De lezer kan echter op het verkeerde been gezet worden door de opmerking dat klimaatmodellen (AOGCMs) met hoge ECS-waarden goed overeenkomen met het 'waargenomen klimaat'. Dit betekent simpelweg dat die modellen bepaalde eigenschappen van het huidige klimaat vrij aardig kunnen simuleren; het betekent niet dat ze de opwarming van de aarde (d.w.z. klimaatverandering) goed simuleren. De auteurs plaatsen dan enkele kanttekeningen de observationele schattingen, waar in degelijke studies normaal gesproken, als ze belangrijk zijn, rekening mee wordt gehouden.

Modellen overschatten de opwarming

Veel van de informatie in het AR5-rapport is gebaseerd op de nieuwste generatie AOGCMs (de zogenaamde CMIP5-modellen). Meer dan twintig groepen

⁷⁷IPCC gaf een lange lijst met aanpassingen vrij die zijn aangebracht in de laatste conceptversie van het rapport: http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/docs/review/WG1AR5_SubstantiveEditsList_All_Interim.pdf.

⁷⁸De cover van de 'final draft' die op 30 september 2013 werd vrijgegeven stelde: 'Voor de publicatie van het rapport zal er eindredactie plaatsvinden en zullen eventuele fouten gecorrigeerd worden, overeenkomstig het IPCC-protocol voor de omgang met mogelijke fouten.'

Een gevoelige kwestie

in de wereld deden speciale runs met hun klimaatmodellen voor het vijfde IPCC-rapport. De modellen simuleren eerst de opwarming over de afgelopen 150 jaar en gaan dan verder met het geven van projecties van toekomstige klimaatverandering, gebruik makend van verschillende scenario's voor toekomstige broeikasgasconcentraties. Deze projecties zijn belangrijk voor beleidsdoelinden. Ze geven een idee van de hoeveelheid opwarming die we kunnen verwachten bij verschillende emissie-scenario's en daarom hoe ambitieus mitigatiebeleid zal moeten zijn om doelstellingen voor de maximale stijging van de mondiale temperatuur te kunnen halen.

Het virtuele klimaat in de GCMs blijkt echter veel gevoeliger te zijn voor CO₂ en andere broeikasgassen dan het werkelijke klimaat. Dat is althans wat de beste observationele studies in Tabel 2 suggereren. De CMIP5-modellen geven uiteindelijk een opwarming van gemiddeld 3.2°C⁷⁹ als de concentratie van CO₂ wordt verdubbeld. Dit is bijna twee keer zoveel als de observationele studies aangeven. Door geen beste schatting te geven ontkwam het IPCC eraan om de verschillen tussen observationele en modelgebaseerde schattingen voor klimaatgevoeligheid te benoemen.

Veel recente media-aandacht is gericht op de stagnatie in de mondiale opwarming in de laatste vijftien jaar, die de modellen niet zagen aankomen. Verdedigers van de modellen zijn geneigd toe te geven dat problemen hebben met natuurlijke fluctuaties in het klimaat, die tien tot vijftien jaar kunnen duren. De situatie is echter veel erger. Vrijwel alle modellen die het IPCC in haar rapport gebruikt, geven ook te veel opwarming als we naar langere periodes tot wel 35 jaar kijken, lang genoeg om te beschouwen als een tijdschaal voor klimaat. Zie Figuur 3 hieronder.⁸⁰

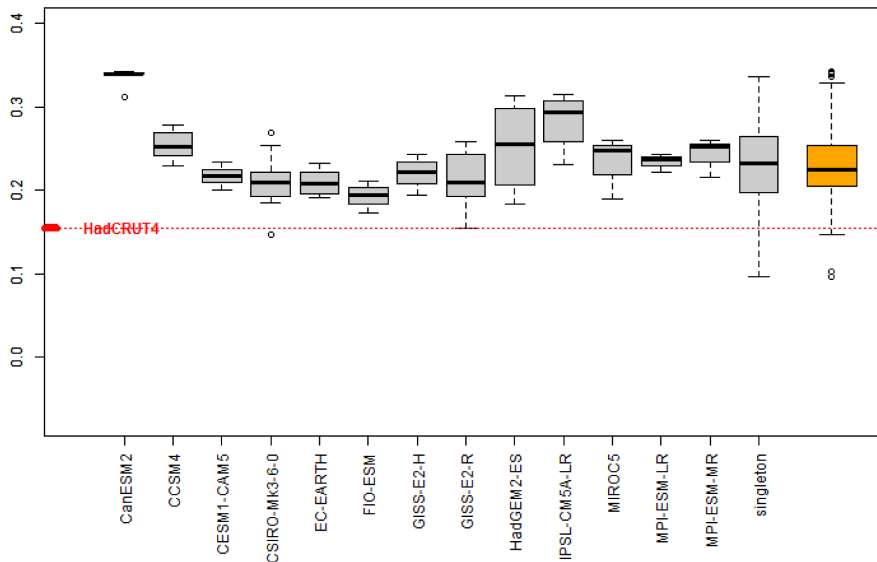
Merk op dat de Figuur hierboven afkomstig is van een blogartikel. Nergens in AR5 is een vergelijkbare grafiek te vinden. Degene die het dichtst in de buurt komt is Figuur 1 in Box 9.2, hier weergegeven als Figuur 4.

Met deze Figuur probeert het IPCC te laten zien dat de recente stagnatie voornamelijk te maken heeft met de keuze voor het warme El Niño-jaar 1998 als

⁷⁹De gemiddelde CMIP5-waarde voor ECS is hier vermeld in plaats van de mediaan, omdat AR5 gemiddelden toont in plaats van medianen bij de projecties van de modellen.

⁸⁰De opwarmingstrends van de drie in AR5 gebruikte mondiale datasets voor de periode 1979–2013 zijn zeer vergelijkbaar; de trend in HadCRUT4 is de middelste van de drie. Meerdere bloggers lieten recent zien dat modellen de opwarming in de laatste 15-35 jaar overschatten. Zie <http://climateaudit.org/2013/09/24/two-minutes-to-midnight/>, <http://rankexploits.com/musings/2013/leaked-spm-ar5-multi-decadal-trends/> en <http://rogerpielkejr.blogspot.nl/2013/09/global-temperature-trends-and-ipcc.html>. Een recent commentaar in Nature Climate Change kwam tot dezelfde conclusie: Fyfe et al. (2013).

Modeltrends in mondiale temperatuur 1979–2013 109 CMIP5-modellen

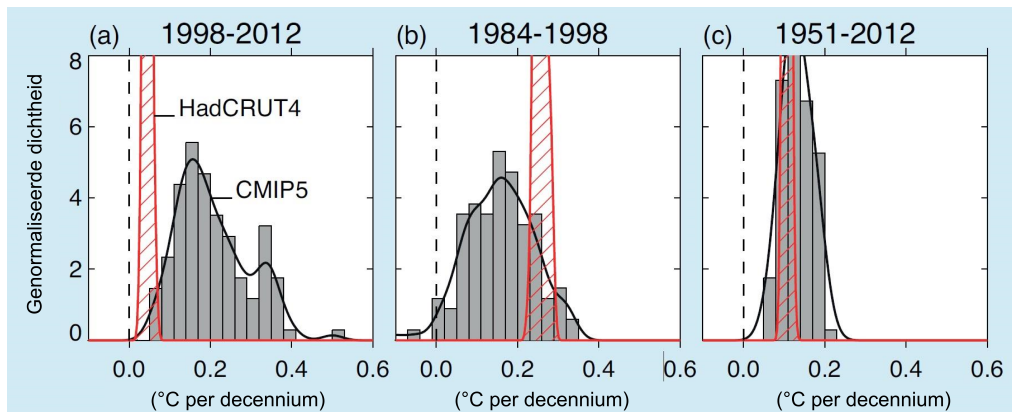


Figuur 3: Gemodelleerde versus geobserveerde temperatuurtrends 1979–2013

Temperatuurtrends in °C/decennium. Vrijwel alle modellen warmden de afgelopen 35 jaar aanzienlijk sneller op dan het werkelijke klimaat. Bron: <http://climateaudit.org/2013/09/24/two-minutes-to-midnight/>. Modellen met meerder runs hebben gescheiden doosdiagrammen; modellen met maar één run zijn samengevoegd tot één doosdiagram getiteld 'singleton'. Het oranje doosdiagram helemaal rechts is het gemiddelde van alle modelruns. De standaardinstellingen voor de boxplot-functie in R zijn gebruikt; de uiteinden van de diagrammen vertegenwoordigen het 25e en 75e percentiel. De rode gestippelde lijn toont de waargenomen opwarmingstrend op basis van de HadCRUT4-dataset.

startpunt. Figuur 4(a) laat zien dat de CMIP5-modellen de HadCrut4-trend sinds 1998 overschatten. In Figuur 4(b) kun je vervolgens echter zien dat de modellen de waarnemingen over de periode 1984–1998 juist onderschatten. De boodschap is dus dat als je kijkt naar korte periodes van 15 jaar, de modellen soms 'te warm' zijn en soms 'te koud'. Figuur 4(c) laat dan ten slotte zien dat de modellen het over een langere periode, in dit geval 60 jaar, goed doen. Verrassend is dit niet want modellen zijn waarschijnlijk zo afgesteld (*tuned*) dat ze redelijk goed overeenkomen met de toename in de mondiale temperatuur, die voornamelijk plaatsvond na 1950. De discrepantie tussen modellen en observaties gedurende de laatste 35 jaar wordt gemakshalve niet getoond. Die periode is lang genoeg om relevant te zijn voor het klimaat.

Een gevoelige kwestie



Figuur 4: Frequentieverdeling van trends in de mondiale temperatuur gebaseerd op 114 CMIP5-modelruns

De grijze balken vertegenwoordigen de modelruns voor de perioden (a) 1998–2012, (b) 1984–1998, (c) 1951–2012. Die worden vergeleken met de onzekerheidsmarge voor de waargenomen trend voor dezelfde periodes op basis van de HadCRUT4-dataset (rood gearceerd). Uit AR5, Box 9.2, Figuur 1.

Dus modellen overschatten de werkelijke opwarming van het klimaat over de laatste 35 jaar met 50%. En diezelfde modellen hebben ECS- en TCR-waarden die aanzienlijk hoger zijn dan de observationele schattingen. Geen van deze belangrijke observaties werd expliciet gemaakt door het IPCC in AR5.

Overgangsklimaatgevoeligheid in AR5

Tot nu toe hebben we het voornamelijk gehad over het wetenschappelijke bewijs voor schattingen van ECS. Maar het duurt eeuwen tot millennia voordat het klimaatsysteem een nieuwe evenwichtstoestand bereikt en daarom zijn klimaatonderzoekers geneigd om de overgangsklimaatgevoeligheid (*Transient Climate Response*, TCR) als beleidsrelevanter te beschouwen. Andrews en Allen (2008) schreven dat 'TCR tevens van doorslaggevend belang is voor klimaatverandering in de 21e eeuw'.⁸¹

AR5 toonde in Figuur 10.20(a), hier weergegeven als Figuur 5, een range voor observationele schattingen van TCR. Een van ons (Lewis) heeft een kritische

⁸¹ Hoewel dit voor het werkelijke klimaat bijna per definitie waar is, is het niet zeker of TCR in de CMIP5-modellen ook een betere indicator is voor toekomstige opwarming dan ECS, als beide optimaal geschaald zijn.

analyse geschreven over het merendeel van die TCR-studies.⁸² De analyse constateert ernstige tekortkomingen in alle studies met uitzondering van Gillett et al. (2013), Otto et al. (2013) en Schwartz (2012). De met observaties afgebakende TCR-schattingen door een aantal individuele CMIP5-modellen, te zien in een Figuur in de Gillett et al. (2013)-studie duiden op een beste schatting voor TCR van 1,4°C, met een 5–95% range van 0,8–2,0°C.⁸³ De Otto et al. (2013) TCR-range van 0,9–2,0°C op basis van het decennium 2000–2009 heeft een beste schatting van 1,3°C. Met data uit de periode 1970–2009, waarin de signaal-ruisverhouding lager is, komt dezelfde studie uit op iets meer dan 1,35°C. De range in Schwartz (2012) ligt met 0,85–1,9°C iets lager en heeft een beste schatting van 1,3°C.

Een beste schatting van 1,3°C voor TCR hebben we eerder in dit rapport ook afgeleid (zie pagina 27) met een energiebalans-analyse en met de AR5-schattingen voor de forcering en 1995–2011 als eindperiode.⁸⁴ Voor een gedetailleerde bespreking van die schatting en van de observationele TCR-schattingen die meegenomen zijn in Figuur 10.20(a) in AR5 verwijzen we naar een blogbericht op Climate Audit.⁸⁵

De waarschijnlijkheidsrange voor TCR in AR5 is 1–2,5°C, waarbij het volgens IPCC 'extreem onwaarschijnlijk' is dat TCR groter is dan 3°C. Dat wijkt slechts marginaal af van het AR4-rapport, waarin gesteld werd dat TCR 'zeer waarschijnlijk' in de range 1–3°C ligt. In geen van beide rapporten werd een beste schatting voor TCR gegeven. Een beste schatting van TCR van 1,3 of 1,4°C (1,3°C als je de puur observationele schatting voor de aerosolforcering in AR5 gebruikt) kan afgeleid worden uit informatie⁸⁶ in de SPM over de veranderingen in de periode 1951–2010, een goed gedocumenteerde periode. Al het

⁸² Zie http://niclewis.files.wordpress.com/2013/11/ar5_tcr_estimates2.pdf.

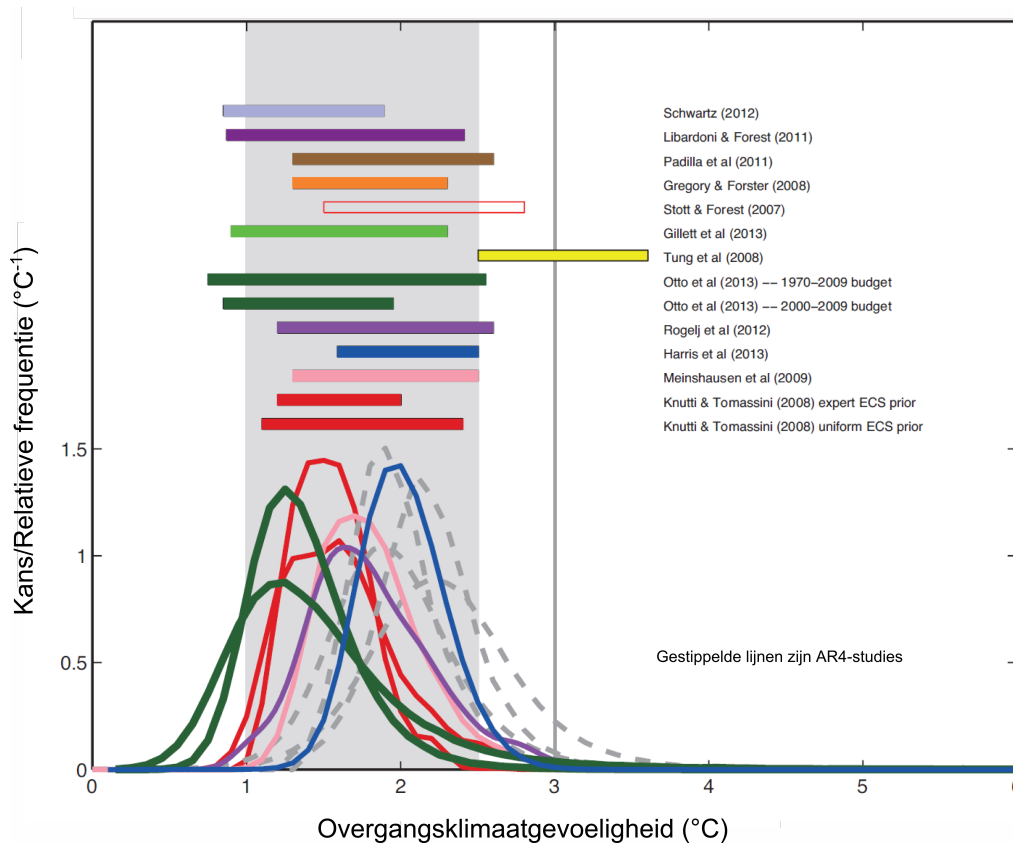
⁸³ Omdat de regressie per model werd gedaan in plaats van een enkele regressie op alle modellen, geeft deze range niet alle onzekerheden weer die wel te zien zijn in Figuur 5.

⁸⁴ Met de aerosolforcering aangepast aan het gemiddelde van de schattingen in AR5 op basis van satellietmetingen; zonder die aanpassing zou de beste schatting voor TCR uitkomen op 1,36°C.

⁸⁵ <http://climateaudit.org/2013/12/09/does-the-observational-evidence-in-ar5-support-its-the-cmip5-models-tcr-ranges/>.

⁸⁶ Een TCR van 1,4°C kan afgeleid worden uit cijfers in de SPM. We nemen steeds het midden van de range van de geschatte bijdragen in sectie D.3 in de SPM, 0,9°C graden opwarming door broeikasgassen en een bijdrage van –0,25°C van andere antropogene forcering over de periode 1951–2010, totaal dus 0,65°C als gevolg van een geschatte toename in de forcering tussen 1950 en 2011 van 1,72 Wm⁻² op basis van Figuur SPM.5, waarvan we 0,04 Wm⁻² aftrekken om te corrigeren voor het extra jaar 2011. We vermenigvuldigen tenslotte met $F_{2\times CO_2}$ van 3,71 Wm⁻². Als we de lineaire trendtoename nemen van 0,64°C over 1951–2010 uit Jones et al. (2013) – de studie waarnaar deze sectie uit de SPM naar verwijst – (de geschatte bijdrage van interne variabiliteit zijnde nul) en we de lineaire trendtoename in de totale forcering nemen uit AR5 van 1,73 Wm⁻², dan is de TCR eveneens 1,4°C. Gebruiken we echter de aerosolforcering die is gebaseerd op satellietmetingen dan daalt de TCR tot 1,3°C.

Een gevoelige kwestie



Figuur 5: Schattingen voor de overgangsklimaatgevoeligheid TCR in Figuur 10.20(a) in het vijfde IPCC-rapport

De balken geven de 5–95% onzekerheidsmarges voor TCR weer.

kwantitatief hoogwaardige observationele bewijs wijst dus op een beste schatting voor TCR van tussen de 1,3 en 1,4°C;⁸⁷ het midden hiervan nemen, dus 1,35°C, lijkt het meest gepast. Op basis van de 5–95% ranges voor Gillett et al. (2013), Otto et al. (2013) en Schwartz (2012) – alle andere schattingen in Figuur 10.20(a) bevatten fouten – lijkt een waarschijnlijkheidsrange voor TCR van 1–2°C nog tamelijk conservatief.⁸⁸

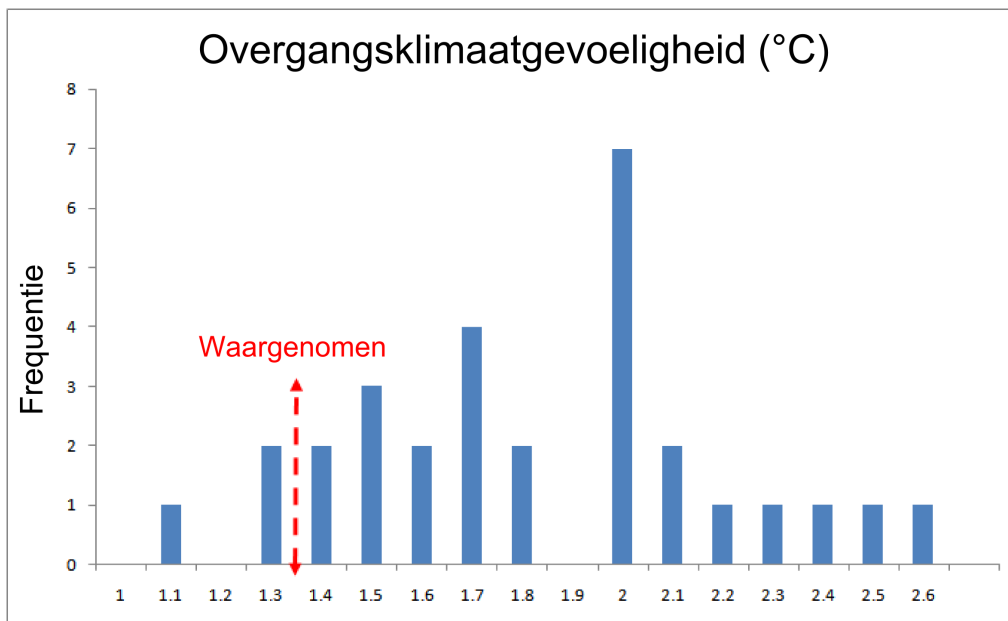
De TCR van de CMIP5-modellen daarentegen zit met een gemiddelde van 1,8°C

⁸⁷ Hoewel het geen peer reviewed publicatie betreft is het zinvol op te merken dat de zeer gerespecteerde klimaatonderzoeker Isaac Held beargumenteert dat TCR waarschijnlijk beneden de 1,8°C ligt en dat hij met een beste schatting komt van 1,4°C. Zie www.gfdl.noaa.gov/blog/isaac-held/2012/04/30/27-estimating-tcr-from-recent-warming/.

⁸⁸ Zelfs de Otto et al. (2013)-schatting gebaseerd op de periode 1970–2009, die de breedste 5–95% range geeft (0,7–2,5°C) van de drie genoemde studies, geeft een 17–83% waarschijnlijkheidsrange van 1,0–1,9°C.

gemiddeld 35% boven de beste observationele schatting van 1,35°C. Sommige 'gevoelige' modellen zitten nog aanzienlijk hoger (het Britse Met Office HadGEM2-ES model heeft bijvoorbeeld een TCR van 2,5°C).

Figuur 6 vergelijkt de beste empirische schatting voor TCR met de TCR-waarden van de 30 klimaatmodellen die gebruikt zijn in het vijfde IPCC-rapport.



Figuur 6: Spreiding van de TCR van CMIP5-modellen in Tabel 9.5 van AR5

De hoogte van de balken geeft aan hoeveel modellen in Tabel 9.5 die specifieke waarde voor TCR hebben.

Figuur 6 laat duidelijk zien dat de beste observationele schatting en de TCR van modellen niet met elkaar overeenkomen. Niettemin stelt AR5 in Box 12.2 dat:

...de observationele en model-gebaseerde schattingen voor de ranges van TCR komen goed overeen, wat ons vertrouwen vergroot in de beoordeling van de onzekerheden rond de projecties voor de 21e eeuw.

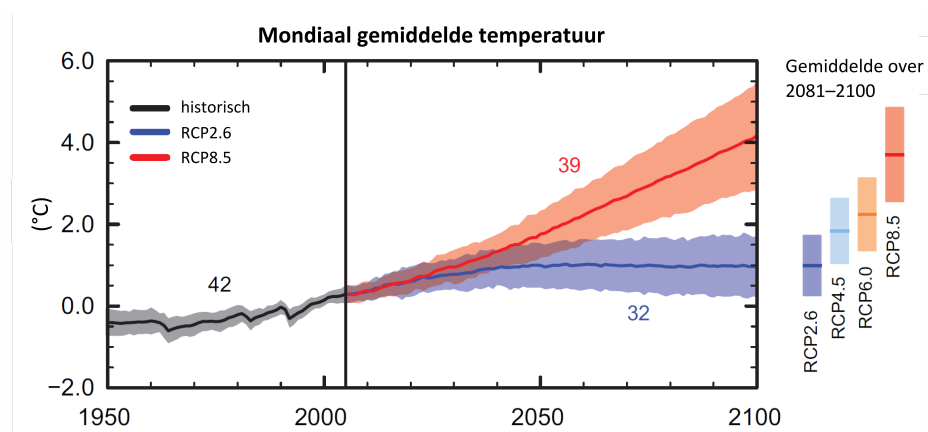
Hoe kan dit een eerlijke conclusie zijn als de gemiddelde TCR van de modellen 35% hoger is dan de beste observationele schatting van 1,35°C, en terwijl

Een gevoelige kwestie

bijna de helft van de modellen een TCR hebben die 50% of meer boven dat niveau ligt? Door niet een grafiek als onze Figuur 6 te tonen en door een misleidend statement in het rapport verdoezelde het IPCC de enorme discrepantie tussen modellen en observaties.⁸⁹

Wat zal de toekomst brengen?

Het AR5-rapport presenteerde in de SPM projecties van de mondiale oppervlaktetemperatuur tot aan 2100, gebaseerd op vier scenario's voor toekomstige broeikasgasconcentraties. Deze projecties zijn gebaseerd op simulaties met de CMIP5-AOGCMs. Figuur 7 hieronder (een weergave van Figuur SPM7) toont de projecties voor twee scenario's. RCP8.5 is het hoogste scenario en RCP2.6 het laagste. De recente toename van broeikasgasconcentraties zit dicht tegen de twee middelste scenario's aan, RCP4.5 and RCP6,⁹⁰ ook al lijken de emissies toe te nemen met een tempo dat dicht bij het RCP8.5-scenario ligt.



Figuur 7: Projecties voor veranderingen in de mondiale temperatuur in de rest van de eeuw

Reproductie van Figuur SPM.7 in AR5. De temperatuurveranderingen zijn ten opzicht van het gemiddelde over de periode 1986–2005, dat 0,6°C boven het pre-industriële niveau lag. De getallen in de Figuur geven aan op hoeveel modellen het modelgemiddelde gebaseerd is.

⁸⁹<http://climateaudit.org/2013/12/09/does-the-observational-evidence-in-ar5-support-its-the-cmip5-models-tcr-ranges/>.

⁹⁰Emissies en de daaruit voortvloeiende broeikasgasconcentraties tussen de RCP4.5- en RCP6-scenario's wijken tot 2050 niet noemenswaardig van elkaar af.

De CMIP5-modellen voorzien, ongeacht het scenario, een opwarming voor de komende twee decennia van 0,48–1,15°C.⁹¹ In de final draft van het AR5-rapport was die schatting echter met 40% naar beneden bijgesteld tot 0,3–0,7°C, waarmee het IPCC klaarblijkelijk erkent dat de modellen over het geheel genomen onrealistisch snel opwarmen. De langetermijnprojecties werden echter niet aangepast. Het gevolg is een sprong in de verwachte temperatuur tussen 2016–2035 en 2046–2065.

‘Observationele’ projecties voor 2100

Zoals we zullen laten zien liggen de projecties gedaan met CMIP5-modellen voor 2081–2100 ver boven projecties die gebaseerd zijn op de ‘beste observationele’ schatting voor TCR die we eerder in dit rapport afleidden.⁹² In Tabel 3 tonen we voor elk scenario hoeveel opwarming AR5 verwacht voor de periode 2081–2100, gebaseerd op de verschillende scenario’s die het IPCC gebruikt ten opzichte van de referentieperiode 1850–1900 en ook ten opzichte van 2012 (door dus de opwarming tussen 1850–1900 en 2012 ervan af te trekken). De tweede en derde kolom laten de projecties zien van de CMIP5-klimaatmodellen.

De volgende twee kolommen tonen de opwarming gebaseerd op een beste observationele schatting voor TCR van 1,35°C. De getallen zijn tot stand gekomen door de schatting voor TCR voor elk scenario naar rato aan te passen aan de verwachte toename van de totale forcering tussen 2012 en 2081–2100 en door rekening te houden met nog niet gerealiseerde opwarming als gevolg van historische emissies (de zogenaamde warming in the pipeline).

De meest rechtse kolom geeft de verhouding weer tussen de op CMIP5-modellen gebaseerde opwarming en de op TCR-gebaseerde projecties vanaf het jaar 2012.

Het is overduidelijk dat de klimaatmodellen de mate van opwarming in de toekomst flink overschatten in vergelijking met wat de beste observationele

⁹¹ 2016–2035 ten opzichte van 1986–2005.

⁹² De schattingen voor de opwarming zijn tot stand gekomen door de beste schatting voor TCR van 1,35°C te vermenigvuldigen met de verandering in de totale forcering tussen 2012 en 2081–2100 voor de verschillende RCP forceringsdata, en 0,15°C extra opwarming te rekenen voor de niet-gerealiseerde opwarming door bestaande forcering, die in 2012 de oceanen opwarmde maar die tegen die tijd (2081–2100) is omgezet in een temperatuurstijging aan het oppervlak. Deze op TCR gebaseerde projecties zijn consistent met meer geavanceerde berekeningen met een zogenaamd 2-box model. De gemiddelde temperatuur gebruiken voor het decennium dat in 2012 eindigt in plaats van 2012 zelf maakt geen verschil.

Tabel 3: Opwarming tot aan het eind van de 21e eeuw

Scenario	Opwarming in 2081–2100 op basis van:				CMIP5/TCR ratio t.o.v.
	de CMIP5-modellen		een TCR van 1,35°C		
	°C t.o.v.	°C t.o.v.	°C t.o.v.	°C t.o.v.	
Referentie	1850–1900	2012*	1850–1900*	2012	2012
RCP2.6	1,6	0,8	1,0	0,2	3,4×
RCP4.5	2,4	1,6	1,6	0,8	2,0×
RCP6.0	2,8	2,0	2,0	1,2	1,7×
RCP8.5	4,3	3,5	2,9	2,1	1,7×

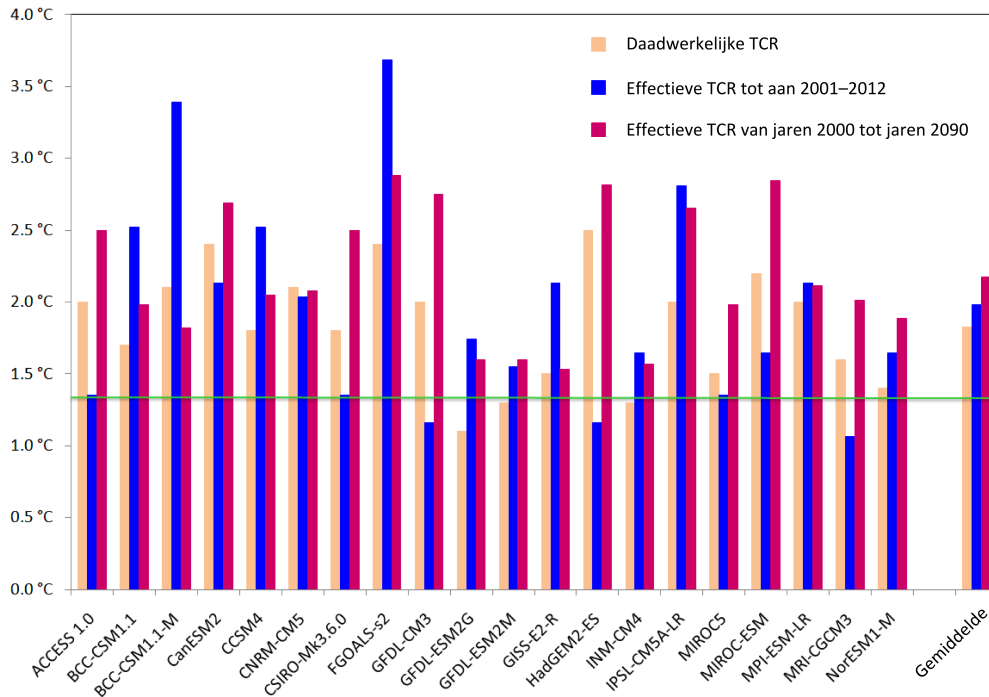
*De opwarming tussen 2012 en de referentieperiode 1850–1900 bedroeg 0,76°C. Deze onafgeronde waarde is gebruikt voor het berekenen van de verhouding tussen de op CMIP5-modellen en op TCR-gebaseerde opwarming in de laatste kolom. Voor de derde en vierde kolom is een afgeronde waarde van 0,8°C gebruikt.

schatting van TCR voor de toekomst impliceert. Vergelijken we de twee typen projecties met elkaar (zoals in de laatste kolom gebeurt), waarbij we het lage RCP2.6-scenario weglaten, dan geven de op modellen gebaseerde projecties 1,6 tot 2 keer zoveel opwarming dan de projecties met de beste observationele schatting voor TCR. Bij het RCP6.0-scenario bevindt de totale opwarming in 2081–2100 – een stijging van 1,3°C ten opzichte van 2012 vergeleken met 2°C opwarming in de CMIP5-modellen – zich nog altijd rond de internationaal gehanteerde tweegradendoelstelling.

Deze exercitie legt nog iets anders bloot dat niet duidelijk gemaakt wordt in AR5: veel CMIP5-modellen simuleren een snellere toename van de mondiale temperatuur, met name in de toekomst, dan de modelwaarden voor de TCR uitwijzen. Terwijl de gemiddelde TCR-waarde van de modellen 1,8°C is, 35% hoger dan de beste observationele schatting van 1,35°C, liggen de projecties op basis van de CMIP5-modellen veel meer dan 35% hoger dan de projecties op basis van de beste observationele TCR. Met data uit Forster et al. (2013) kunnen we schattingen maken van de effectieve gemiddelde modelwaarde voor TCR voor de instrumentele periode en die voor de rest van de eeuw. Die schattingen komen uit op 2,0°C voor de instrumentele periode en 2,2°C voor de 21e eeuw.⁹³ Figuur 8 toont deze TCR-waarden. In veel modellen is de relatie tussen de effectieve TCR en de daadwerkelijke TCR (volgens de definitie) niet

⁹³De effectieve TCRs voor de instrumentele periode (effectieve historische TCRs) zijn voor elk model geschat als het gemiddelde van de gesimuleerde toename in de mondiale temperatuur vanaf de start van de simulatie (1850 of 1860) tot aan 2001–05 voor de historische run en tot aan 2008–12 voor de RCP4.5 run, gedeeld door de gemiddelde toename in de totale forcering bij het RCP4.5-scenario over dezelfde perioden en vermenigvuldigd met $F_{2\times\text{CO}_2}$ (van 3,71 W/m²) voor de omzetting naar een effectieve TCR. De effectieve TCRs van de jaren 2000 tot de jaren 2090 zijn op dezelfde manier berekend, gebaseerd

stabiel en voor het merendeel van de modellen geldt dat de effectieve model-TCR hoger is in de 21e eeuw.



Figuur 8: Waarden voor de effectieve TCR in CMIP5-modellen

De zalmkleurige staven tonen de TCR-waarden van de verschillende modellen, geschat op basis van de definitie voor TCR, dus door de CO₂-concentratie in het model gedurende 70 jaar met 1% per jaar te laten toenemen. De blauwe staven tonen de modelschattingen voor TCR op basis van simulaties gedurende de instrumentele periode, tot aan de periode 2001–12. Dit noemen we de ‘effectieve’ historische modelwaarde voor TCR. De magenta staven tonen de TCR-schattingen op basis van projecties tussen nu en 2091–99 (gebaseerd op het RCP8.5-scenario). Dit noemen we de ‘effectieve’ toekomstige modelwaarde voor TCR. Zie voetnoot 92 voor details over de berekeningen. Het gemiddelde van alle modellen (*mean*) is helemaal rechts weergegeven. De horizontale groene lijn geeft de beste observationele schatting voor TCR weer van 1,35°C. Bron: Forster et al. (2013)

Er zijn waarschijnlijk meerdere oorzaken voor dit gedrag. Een ervan is dat

op de veranderingen in de modelgesimuleerde temperatuur tot aan 2091–99 bij het RCP8.5-scenario en de daarbij horende verandering in de totale forcering. Er is bij elk van de veranderingen in de modeltemperatuur 0,15°C in mindering gebracht vanwege de opwarming die in het werkelijke klimaat zou zijn opgetreden in de jaren 2090 als gevolg van de forcering uit het verleden. Deze twee definities van de effectieve TCR komen redelijk overeen met de algemene definitie voor TCR in sectie 10.8.1 van AR5, dat voorziet in een ‘warming-in-the-pipeline’ in de modellen van 0,15°C.

Een gevoelige kwestie

CMIP5-modellen doorgaans meer *warming-in-the-pipeline* zullen genereren tussen nu en 2091–2099 dan de observationele schattingen voor ECS en TCR aannemelijk maken. Een andere is dat in sommige modellen de effectieve klimaatgevoeligheid toeneemt gedurende de 21e eeuw, wat te maken heeft met afhankelijkheid van de toestand van het klimaat en/of niet-lineaire effecten. Een derde is dat volgens de RCP-scenario's aerosolemissies bijna zullen halveren tot 2100 terwijl de broeikasgasemissies tegelijkertijd sterk zullen stijgen. Dit betekent dat modellen met aerosolforceringen die hoger zijn dan de schattingen in de RCP-dataset, een kleinere toename van de totale forcering zullen simuleren in het verleden dan de RCP-dataset maar een grotere totale forcering in de toekomst. Als de RCP-forceringen aangepast waren aan de beste schattingen in AR5, wat neerkomt op het minder negatief maken van de aerosolforcering,⁹⁴ dan zou het verschil tussen de effectieve toekomstige model-TCR en de effectieve historische model-TCR aanzienlijk groter geweest zijn.

Conclusies

De klimaatwetenschap heeft de laatste jaren onder vuur gelegen. Een enorme klap voor de geloofwaardigheid van het vakgebied was Climategate, de duizenden gehackte e-mails van klimaatonderzoekers van de Climatic Research Unit (CRU) aan de University of East Anglia, waaronder diverse hoofdauteurs van IPCC-rapporten. De e-mails lieten zien dat sommige onderzoekers sceptische studies uit de *peer-reviewed*-literatuur en uit het IPCC-rapport probeerden te houden en dat ze *Freedom of Information*-aanvragen blokkeerden. Vlak daarna werden er fouten ontdekt in het vierde IPCC-rapport waarvan het smelten van de Himalaya-gletsjers in 2035 de meest zichtbare was. Alle fouten maakten klimaatverandering 'erger', wat duidde op een bias in het IPCC-proces.

De wetenschappelijke gemeenschap van klimaatonderzoekers benadrukte dat alle fouten gevonden waren in Werkgroep II, dat zich richt op de impact van klimaatverandering en dat er geen fouten waren ontdekt in het Werkgroep I-rapport. Zelfs de InterAcademy Council,⁹⁵ die het IPCC-proces onderzoekt, concludeerde dat de voornaamste bevindingen van het rapport overeind bleven staan: het klimaat verandert en de mens is de oorzaak.⁹⁶

⁹⁴ De met tussenpozen aanwezige vulkanische forcering zou sterker hebben moeten worden, maar dat zou weinig effect hebben op de berekening.

⁹⁵ <http://reviewipcc.interacademycouncil.net/>.

⁹⁶ Een vreemde conclusie aangezien de IAC niet gevraagd was de wetenschap te reviewen maar alleen het IPCC-proces en de organisatie.

Werkgroep I-rapporten bevatten weinig fouten van het type 'de Himalayagletsjers zijn in 2035 gesmolten'. De tekortkomingen in Werkgroep I-rapporten zijn veel subtieler maar kunnen ook veel belangrijker zijn. In dit rapport hebben wij laten zien dat AR4 in 2007 een verkeerde voorstelling gaf van een belangrijke observationele schatting voor klimaatgevoeligheid. Het IPCC gaf een hogere schatting voor klimaatgevoeligheid dan de oorspronkelijke studie en door deze aanpassing lijkt het klimaatprobleem derhalve 'erger'. Misschien nog wel belangrijker is dat deze episode erop wijst dat de IPCC-auteurs de Bayesiaanse statistische methoden die gebruikt worden bij het schatten van klimaatgevoeligheid niet helemaal onder de knie hebben.

Het IPCC had in het recent gepubliceerde AR5-rapport de kans beleidsmakers goed nieuws te brengen. Het beste observationele bewijs geeft aan dat de klimaatgevoeligheid waarschijnlijk dicht bij de ondergrens ligt van de range die het IPCC al dertig jaar hanteert. De beste schatting voor klimaatgevoeligheid ligt zelfs onder de wat hogere ondergrens van 2,0°C in het AR4-rapport. Zoals we hebben laten zien bracht het IPCC dit nieuws niet in duidelijke bewoordingen.

Hoofdauteurs zijn gebonden aan de beperkingen van het IPCC-proces. De richtlijnen van het IPCC zeggen dat het doel van het IPCC is om op een 'allesomvattende, objectieve, open en transparante wijze de wetenschappelijke, technologische en socio-economische kennis, die van belang is om het risico van antropogene klimaatverandering te begrijpen, te beoordelen'.⁹⁷ 'Allesomvattend' betekent dat de auteurs rekening moeten houden met alle gepubliceerde literatuur, behalve met die studies die inmiddels achterhaald zijn danwel aantoonbaar onjuist. Dit is wat de IPCC-auteurs deden in AR5, ze presenteerden netjes de schattingen voor klimaatgevoeligheid uit een groot aantal gepubliceerde studies (zie onze Figuur 2), waaronder diverse studies die wij als onvoldoende bestempelen. De auteurs gaven de informatie die te halen is uit de recente instrumentele periode, met name de veranderingen in temperatuur en ze erkenden dat het afbakenen van de aerosolforcing en de warmte-opname door de oceanen cruciaal is voor het schatten van de evenwichtsklimaatgevoeligheid. Daar zijn wij het mee eens maar we zouden willen toevoegen dat de statistische methodiek wel solide moet zijn. Voor veel studies gold dat niet.

Naar onze mening hadden de observationele assessments van ECS en TCR in AR5 primair gevoed moeten worden door schattingen die gebaseerd zijn op

⁹⁷http://www.ipcc.ch/organization/organization_history.shtml.

Een gevoelige kwestie

temperatuurveranderingen in de instrumentele periode en die gebruik maken van goed afgebakende observationele schattingen voor aerosolforcing en (voor ECS) voor de warmte-opname van de oceanen en die gebruik maken van een degelijke statistische methode. Met die criteria hadden de auteurs alle hoge schattingen voor ECS en TCR in de Figuren 2 en 6 moeten afwijzen. De studies die aan de criteria voldoen, zouden beste observationele schattingen voor ECS en TCR hebben ondersteund die aanzienlijk onder de gemiddelde waarden van klimaatmodellen liggen, en een lagere observationele range voor ECS dan de range in AR5.

Wij hebben wat gespeculeerd over de redenen waarom AR5 geen 'beste schatting' geeft voor klimaatgevoeligheid. Het lijkt vooral te gaan om de groeiende kloof tussen schattingen gebaseerd op modellen en die op observaties. Het lijkt aannemelijk dat het IPCC deze discrepantie geen aandacht wilde geven omdat het de suggestie zou kunnen wekken dat beleidsmakers de projecties van de modellen met argusogen zou moeten bekijken.

Door de IPCC-aanpak om 'allesomvattend' te zijn kunnen de auteurs zich onthouden van de duidelijke statement die wij in dit rapport wel hebben afgegeven, namelijk dat klimaatgevoeligheid dichtbij de – sinds AR4 weer omlaag gebrachte – ondergrens van 1,5°C ligt. Figuur 2 (Figuur 1 in Box 12.2 van AR5) wekt de indruk dat, zelfs als je alleen de observationele studies in ogenschouw neemt, diverse studies een hogere waarde voor klimaatgevoeligheid onderbouwen. Zolang de zwakheden in studies niet zijn gedocumenteerd in *peer reviewed*-papers is het lastig voor de IPCC-auteurs om deze studies resoluut af te wijzen. In dit geval vertroebelen 'zwakke studies', en studies die aerosolforcing uit modellen gebruiken, het beeld.

Samenvattend: wij vinden dat het WGI-rapport en de SPM, voornamelijk door de beperkingen die het modelgeoriënteerde IPCC-proces met zich meebrengt, er niet in geslaagd zijn om een adequate assessment te maken voor zowel ECS als TCR, wat zonder meer de belangrijkste parameters zijn in het klimaatdebat. Meer specifiek heeft AR5 de lezer niet attent gemaakt op de divergentie die is ontstaan tussen observationele en op modellen gebaseerde schattingen voor ECS en TCR.

Dankbetuiging

De auteurs willen graag dr. James Annan, professor Judith Curry, professor David Henderson en professor Ross McKittrick en Andrew Montford bedanken voor hun hulp en feedback.

Appendix – Kritiek op een aantal op waarnemingen gebaseerde ECS-schattingen uit AR5

Libardoni en Forest (2013) – gecombineerd

Deze Bayesiaanse multimodelsimulatie-waarnemingen vergelijkingstudie (feitelijk een corrigendum van een studie gepubliceerd in 2011) gebruikt een informatieve 'expert'-priorverdeling voor de ECS en een ongeschikte uniforme priorverdeling voor de efficiëntie van de warmteopname door de oceanen (de vierkantswortel van de effectieve diffusiviteit van de oceaan, K_v). Het gebruik van een dergelijke priorverdeling leidt in deze studie tot een – waarschijnlijk positieve - bias in de schatting van de ECS. Door het gebruik van één oppervlaktetemperatuurreeks vinden Libardoni en Forest een lagere ECS, een K_v die nergens door begrensd wordt, en een aerosolforcing die negatiever is dan wanneer ze twee andere reeksen gebruiken. Maar ondanks een broeikasgasforcing die voor een groter deel gecompenseerd wordt door negatieve afkoeling door aerosolen en meer absorptie van warmte door de oceanen, suggereert energiebehoud dat de ECS significant groter zou moeten zijn om de toename in wereldwijde temperaturen te reproduceren, niet kleiner. Omdat de resultaten van Libardoni & Forest daarmee de wet van behoud van energie schenden, moeten ze worden verworpen. Hoewel diverse fouten die in Lewis (2013) onder de aandacht zijn gebracht gecorrigeerd zijn in dit corrigendum, is er niettemin tenminste één fout op onjuiste manier aangepast, en is de ontoereikende manier waarop oppervlaktetemperaturen gebruikt worden helemaal niet aangepast (zie Lewis, 2013), wat de oorzaak zou kunnen zijn van de hierboven genoemde problemen.

Lin et al. (2010) – instrumenteel

Hoewel deze studie besproken wordt in AR5 tezamen met studies die satellietwaarnemingen van jaarlijkse en jaar tot jaar veranderingen in de TOA stralingsinbalans meenemen, is dit in werkelijkheid een energiebalans-studie die numerieke resultaten van een energiebalansmodel gebruikt. De recente TOA onbalans wordt afgeleid uit een op een gedateerde AOGCM gebaseerde klimaatstelsel warmteopname/TOA stralingsonbalans-schatting (Hansen et al. 2005) van $0,85 \text{ W/m}^2$, die wordt toegepast over het laatste decennium van de 1885–2005 periode zoals gebruikt in deze studie. De warmteopname is twee

Een gevoelige kwestie

keer zo groot als de beste schattingen in AR5 voor hetzelfde decennium. Daarnaast is er geen rekening gehouden met de warmtetoevoer in de oceanen aan het begin van de 120-jaars periode. De methode en het model welke gebruikt worden, in het bijzonder de manier waarop er met het warmtetransport naar de diepe oceaan wordt omgegaan, zijn moeilijk te volgen en lijkt nogal ongebruikelijk. Rekening houdend met de bijzonder grote warmteopname in de diepe oceaan en de twijfelachtige methodiek, is het moeilijk om de resultaten van deze studie als een realistische schatting van ECS te kwalificeren. Auteurs van het IPCC laten duidelijk hun twijfels doorschemeren over de ECS-schatting van deze studie; de resultaten worden gekenmerkt als zijnde incompleet voor zowel de grootste als de kleinste waardes die de studie vermeldt.

Olson et al. (2012) – instrumenteel en combinatie

Deze multimodelsimulatie-waarneming Bayesiaanse vergelijkingsstudie schat de ECS, de effectieve diffusiviteit van de oceaan en een aerosolforcering schalingsfactor met slechts mondiaal gemiddelde temperaturen en een brede uniforme prior voor de aerosolforcering-schalingsfactor. Dat is een niet afdoende methodiek. Omdat de trendontwikkeling van broeikasgassen en aerosolforcering sterk negatief gecorreleerd zijn, kan men een goede vergelijking krijgen met historische mondiaal gemiddelde temperaturen met een veelheid aan mogelijke combinaties van de ECS en de sterkte van de aerosolforcering. Dat probleem leidt er in deze studie toe dat de geschatte waarschijnlijkheidsverdeling van de ECS vrijwel niet begrensd is wanneer een uniforme priorverdeling gebruikt wordt, wat leidt tot een overschatting van de ECS. Het gebruik van veranderingen in 0–700-m oceaantemperaturen en oppervlakte-temperaturen maken het nagenoeg onmogelijke de ECS-aerosol combinaties te begrenzen. De ozonforcering, die significant positief is, is niet meegenomen. Het valt te verwachten dat dat de schatting van de ECS aanzienlijk naar boven zal hebben beïnvloed. Gezien al deze problemen, kan de op waarnemingen gebaseerde ECS van Olson et al. niet als realistisch gezien worden.

De waarschijnlijkheidsverdeling van Olson en de spreiding van de ECS uit de gecombineerde schattingen wordt gedomineerd door een niet-uniforme priorverdeling van de ECS welke overeenkomt met de hoge ECS-schattingen uit het AR4-tijdperk, inclusief die van AOGCMs, zoals beschreven in Knutti en Hegerl (2008). Omdat de gecombineerde ECS-schatting in deze studie gedomineerd wordt door een beginverdeling die gebaseerd is op de ECS-schattingen uit het AR4 tijdperk, had de studie niet meegenomen mogen worden in AR5 als ware het een onafhankelijke en op waarnemingen gebaseerde schatting. De

Olson et al. combinatie-schatting voor de ECS zou daarom genegeerd moeten worden.

Schwartz (2012) – Instrumenteel

Deze studie leidt de ECS af uit veranderingen tot en met 2009 in mondiaal gemiddelde oppervlaktetemperaturen en 0–700-m oceaantemperaturen, en veranderingen in forcering gebaseerd op historische reeksen die gebruikt worden voor historische modelsimulaties. Twee methodes worden gebruikt. Een methode was een door het nulpunt gaande regressie van temperatuurveranderingen met de forcering minus de sterkte van de opwarming, die gefit wordt op post-1964 data. Hoewel dit in beginsel als redelijk beschouwd kan worden, zijn de regressies erg ruizig. De mogelijkheid van warmtetransport in de oceanen in de late 19e eeuw was uitgesloten (daar waar een schatting in Gregory et al. 2002 die als niet-verwaarloosbaar kwalificeert). Het is waarschijnlijk dat dat de schatting van de ECS ietwat te hoog heeft gemaakt. Voor twee van de zes datasets met forceringen die gebruikt worden kunnen de regressies geen variaties in de temperatuurdata verklaren – hun R^2 -waardes zijn negatief. De beste schatting van de ECS van de andere vier forceringsdatasets varieert tussen $1,1^\circ\text{C}$ en $2,6^\circ\text{C}$. De gemiddelde R^2 -waarde was bij benadering 0,5. De tweede methode leidt de ECS af door resultaten van vergelijkbare regressies (maar zonder de mate van opwarming af te leiden uit de forcering) met een op waarnemingen gebaseerde schatting van de warmteopname-coëfficiënt. Deze regressies geven significant hogere R^2 -waardes. De tweede methode geeft vergelijkbare resultaten voor de vier forceringsdatasets waarvoor de eerste methode een valide schatting van de ECS geeft, met een range van $1,07$ – $3,0^\circ\text{C}$ (met inachtneming van onzekerheden in de regressie). Een vijfde forceringsdataset, welke alleen een positieve R^2 gaf voor de regressie waarbij de mate van opwarming niet was afgeleid uit de forcering, gaf, gebruik makend van deze methodiek, een schatting van de ECS van $4,9 \pm 1,2^\circ\text{C}$. Dat verklaart waarom de spreiding in de ECS in deze studie zoals vermeld in Box 12, Figuur 1, van AR5, tot $6,1^\circ\text{C}$ loopt. De regressie R^2 voor deze forceringsdataset was klein (0,29) en de studie concludeert dat de forceringsdataset niet consistent is met een energiebalansmodel waarin de verandering van de netto uitgaande warmtestraling aan de rand van de atmosfeer proportioneel verandert met toegenomen oppervlaktetemperatuur. Het $3,0$ – $6,1^\circ\text{C}$ segment van de ECS spreiding uit deze studie zoals vermeld in AR5 is in zijn geheel gebaseerd op deze ene forceringsdataset, en gegeven de problemen die hiermee zijn gemoeid, zou het beschouwd moeten worden als aanzienlijk minder belangrijk dan dit resultaat voor een-vijfde mee te rekenen.

Tomassini et al. (2007) – Instrumenteel

Deze multi-model-simulatie-waarneming vergelijkingsstudie gebruik een ingewikkelde subjectieve Bayesiaanse methode. Voor de ECS wordt een set van priors gebruikt die varieert tussen een uniforme prior en een opgelegde informatieve lognormale prior met een gemiddelde van 3°C , beide beperkt tot de range van $1-10^{\circ}\text{C}$. Een zeer ontoereikende uniforme prior is gebruikt voor de effectieve diffusiviteit van de oceaan (K_v) – het kwadraat van de warmteopname-coëfficiënt door de oceaan. De keuzes van de prior voor de ECS en K_v hebben beiden tot een te hoge schatting van de ESC geleidt. Hoewel de gebruikte methode een inverse schatting van de aerosolforcing doet via een schalingsfactor, is alleen globaal gemiddelde waargenomen temperatuurdata gebruikt, waardoor de inverse schatting onbetrouwbaar is. De zeer hoge (negatieve) correlatie tussen de tijdsevolutie van broeikasgassen en aerosolforceringen op globale schaal leiden ertoe dat het onmogelijk is om op robuuste wijze onderscheid te maken tussen combinaties van de ECS en waarden voor de aerosolforcing die voldoen aan begrenzungen uit het energiebudget. De posteriori verdeling voor K_v leidt tot meerdere pieken, iets wat onwenselijk is. De Figuur met de "trace" van de Markov-keten Monte Carlo sample die gebruikt wordt om de parameters te schatten laat instabiliteiten zien, niet alleen voor wat betreft welke K_v -waarden de voorkeur genieten maar ook voor wat betreft welke combinatie van ECS en (indirecte) aerosolforcing. Voor sommige delen van de Figuur is het niet duidelijk dat de combinatie van K_v , ECS en waarden voor de aerosolforcing consistent zijn met begrenzungen vanwege behoud van energie. Gezien al deze issues zouden de ECS-schattingen van deze studie genegeerd moeten worden.

Ongelabelde combinatiestudies in AR4

De eerste range op basis van een AR4-studie zoals vermeld in AR5, Box 12.2, en Figuur 1, die niet als AR4-studie aangemerkt is, is die van Annan en Hargreaves (2006). Deze studie is gebaseerd op een combinatie van schattingen van een paleoklimaatstudie van het meest recente glaciële maximum en een studie gebaseerd op de invloed van vulkanische uitbarstingen, gebruik makend van een initiële prior-verdeling met pieken rond 3°C en een 2,5–97,5% bereik van $1-10^{\circ}\text{C}$. Omdat ECS-schattingen gebaseerd op deze beide methodes in AR5 afgekeurd worden, en de prior-verdeling hoge ECS-waarden meer gewicht geeft, zou geen belang aan deze resultaten gehecht moeten worden. De andere marge op basis van AR4 die niet als zodanig aangemerkt is komt

uit Hegerl et al. (2006). Deze studie combineert de eigen afgelopen millennium proxy-schattingen met een op waarnemingen gebaseerde variant van Frame et al. (2005). Problemen met deze studies, in het bijzonder Frame et al. (2005), worden hierboven besproken in de context van de waarschijnlijkheidsverdelingen in Figuur 9.20 van AR4. De Aldrin et al. (2012) gecombineerde schatting welke ook gebruik maakt van de op het afgelopen millennium gebaseerde proxy-schattingen van Hegerl et al. (2006), en welke de voorkeur verdient, geeft een veel lagere en betere begrenzing van het ECS-bereik, wat laat zien dat de paleoklimaatschatting weinig invloed heeft.

Verklarende woordenlijst/afkortingen

AOGCM	Atmosphere-ocean coupled general circulation model; mondiaal klimaatmodel met een gekoppelde atmosfeer en oceaan.
AR4	het vierde IPCC assessment rapport, gepubliceerd in 2007
AR5	het vijfde IPCC assessment rapport, gepubliceerd in 2013-2014. Tenzij anders aangegeven verwijst AR5 in dit rapport naar de geaccepteerde versie van het Werkgroep I-rapport.
<i>Beste schatting</i>	dit verwijst naar de mediaan, tenzij anders vermeld.
CMIP3 modellen	de generatie van AOGCMs voor AR4 (CMIP3) simulaties
CMIP5 modellen	de generatie van AOGCMs voor AR5 (CMIP5) simulaties
ECS	<i>equilibrium climate sensitivity</i> ; evenwichtsklimaatgevoeligheid. De verandering in de jaarlijkse gemiddelde wereldwijde oppervlaktetemperatuur als gevolg van een verdubbeling van de atmosferische CO ₂ -concentratie, nadat de diepe oceanen in evenwicht zijn gekomen met de atmosfeer. Daarbij wordt geen rekening gehouden met onderdelen van het klimaatsysteem die op nog langere tijdschalen dan de diepe oceaan reageren (bijvoorbeeld ijskappen en vegetatie).
<i>Effectieve klimaatgevoeligheid</i>	een schatting van de evenwichtsklimaatgevoeligheid die afgeschat wordt uit niet-evenwichtsomstandigheden. De twee uitdrukkingen worden in dit rapport door elkaar gebruikt, en naar beide wordt verwezen als zijnde ECS, zoals ook gebeurt in AR5.
<i>Forcing</i>	zie stralingsforcering.
GCM	<i>general circulation model</i> ; algemeen circulatiemodel, een wiskundig model van de algemene circulatie in planeet-atmosferen (en soms ook oceanen). Worden net als de AOGCMs ook wel mondiale klimaatmodellen genoemd.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LGM	<i>last glacial maximum</i> ; het meest recente glaciële maximum, het tijdperk met de grootste ijskappen tijdens de laatste ijstijd, ongeveer 21.000 jaar geleden.

<i>Gemiddelde, mediaan, modus</i>	verschillende soorten middelwaardes in gegevens. Het gemiddelde wordt bepaald door alle gegevens op te tellen en te delen door het aantal punten. De mediaan is de middelste waarde in een getallenreeks waarbij de getallen geordend zijn van laag naar hoog. De modus is de waarde die het meest voorkomt in een getallenreeks. Voor continue gegevens, of een onzekerheidsparameter die een waarschijnlijkheidsverdeling hebben in plaats van een reeks van discrete getallen, wordt het gemiddelde bepaald door de waardes van de gegevens of de waarschijnlijkheidsverdeling te integreren. Het gemiddelde is het 50 percentiel van de waarschijnlijkheidsverdeling, waarbij de waarschijnlijkheden dat de gegevens groter of kleiner zijn dan die waarde gelijk aan elkaar zijn. De modus is de waarde behorende bij de piek van de waarschijnlijkheidsverdeling. Verdelingen voor klimaatgevoeligheid zijn vaak behoorlijk assymetrisch (<i>skewed</i>). Voor zulke verdelingen is de mediaan een betere maat voor de beste schatting dan de modus of het gemiddelde.
<i>Ocean heat uptake efficiency</i>	efficiëntie van warmteopname door de oceanen. Een maat voor hoe snel warmte wordt geabsorbeerd door de oceanen dieper dan een relatief dunne menglaag (typisch 100 meter). Voor een diffuus oceaanmodel is de relevante maat voor efficiëntie de vierkantswortel van de effectieve verticale oceaandiffusiviteit.
OHC	<i>ocean heat content</i> ; warmteinhoud van de oceanen, de warmte opgeslagen in de oceaan.
PDF	<i>probability density function</i> ; waarschijnlijkheidsverdeling, een functie die de relatieve waarschijnlijkheid beschrijft dat een variabele een bepaalde waarde heeft. De integraal van de functie over alle mogelijke waardes is in totaal één, en de integraal (het oppervlak onder de waarschijnlijkheidsverdeling) onder een deel van de verdeling geeft de kans dat een variabele zich binnen die range bevindt.

Een gevoelige kwestie

RF	<i>radiative forcing</i> ; stralingsforcering of forcering: de verandering in de netto stralingsbalans bovenin de atmosfeer door een verandering in CO ₂ -concentratie, of in welke andere externe sturende factor dan ook. Het wordt uitgedrukt in de eenheden watt per vierkant meter (W/m ² or Wm ⁻²). De uitdrukking wordt gebruik in zowel dit rapport als AR5 om te verwijzen naar de effectieve stralingsforcering (effective radiative forcing, ERF), een concept dat de effecten van snelle niet-oppervlaktetemperatuur gerelateerde aanpassingen van het klimaatsysteem aan de stralingsforcering meeneemt.
SPM	<i>Summary for Policymakers</i> ; samenvatting voor beleidsmakers (van AR5 WG1 tenzij anders vermeld).
TOA	<i>top-of-atmosphere</i> ; bovenzijde van de atmosfeer.
TCR	<i>transient climate response</i> ; overgangsklimaatgevoeligheid, gedefinieerd als de veranderingen in de globaal gemiddelde oppervlaktetemperatuur, gemiddeld over een 20-jaar periode rondom de tijd van de verdubbeling van atmosferisch CO ₂ in een klimaatmodelsimulatie in welke CO ₂ toeneemt met 1% per jaar, waarbij het 70 jaar duurt voor die verdubbeling in CO ₂ bereikt wordt. De waarde van de TCR kan afgeleid worden uit een andere toename in CO ₂ door het te schalen met de verandering in de mondiaal gemiddelde temperatuur. De TCR kan makkelijker geschat worden dan de ECS, en is meer relevant voor klimaatprojecties van opwarming deze eeuw, maar niet van zeespiegelstijging.
Troposfeer	het laagste deel van de atmosfeer, typisch van het aardoppervlak tot 10 km hoogte op gematigde breedtegraden, waar wolken en het weer zich voordoen. Boven de troposfeer ligt de stratosfeer.
WGI	IPCC Werkgroep I

Referenties

Aldrin, M., M. Holden, P. Guttorp, R.B. Skeie, G. Myhre and T.K. Berntsen, 2012. Bayesian estimation of climate sensitivity based on a simple climate model fitted to observations of hemispheric temperatures and global ocean heat content. *Environmetrics*, 23: 253–271.

Andrews, D. and M. Allen, 2008. Diagnosis of climate models in terms of transient climate response and feedback response time, *Atmos. Sci. Lett.*, 9: 7–12.

Andronova, N.G. and M.E. Schlesinger, 2001. Objective estimation of the probability density function for climate sensitivity. *J. Geophys. Res.*, 106: 22605–22611.

Annan, J.D. and J.C. Hargreaves, 2006. Using multiple observationally-based constraints to estimate climate sensitivity. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L06704.

Annan, J.D. and J.C. Hargreaves, 2011. On the generation and interpretation of probabilistic estimates of climate sensitivity. *Clim. Change.*, 104, 423–436.

Domingues, C.M., J.A.Church, N.J. White, P.J. Gleckler, S.E. Wijffels, P.M. Barker and J.R. Dunn, 2008. Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature*, 453: 1090–3.

Forest, C.E., P.H. Stone, A.P. Sokolov, M.R. Allen and M.D. Webster, 2002. Quantifying uncertainties in climate system properties with the use of recent climate observations. *Science*, 295: 113–117

Forest, C.E., P.H. Stone and A.P. Sokolov, 2006. Estimated PDFs of climate system properties including natural and anthropogenic forcings. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L01705

Forest, C.E., P.H. Stone, and A.P. Sokolov, 2008. Constraining climate model parameters from observed 20th century changes. *Tellus A*.

Forster, P.M.D. and J.M. Gregory, 2006. The climate sensitivity and its components diagnosed from Earth radiation budget data. *J. Clim.*, 19: 39–52.

Forster, P.M., T. Andrews, P. Good, J.M. Gregory, L.S. Jackson, and M. Zelinka, 2013. Evaluating adjusted forcing and model spread for historical and future scenarios in the CMIP5 generation of climate models. *J. Geophys. Res.*, 118: 1139–1150.

Een gevoelige kwestie

Frame D.J., B.B.B. Booth, J.A. Kettleborough, D.A. Stainforth, J.M. Gregory, M. Collins and M.R. Allen, 2005. Constraining climate forecasts: The role of prior assumptions. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L09702.

Fyfe, J.C., N.P. Gillett, and F.W. Zwiers, 2013. Overestimated global warming over the past 20 years. *Nature Clim. Ch.*, 3.9: 767–769.

Gillett, N.P., V.K. Arora, D. Matthews, P.A. Stott, and M.R. Allen, 2013. Constraining the ratio of global warming to cumulative CO₂ emissions using CMIP5 simulations. *J. Clim.*, doi:10.1175/JCLI-D-12-00476.1.

Gregory, J.M., R.J. Stouffer, S.C.B. Raper, P.A. Stott, and N.A. Rayner, 2002. An observationally based estimate of the climate sensitivity. *J. Clim.*, 15: 3117–3121.

Hansen, J., Nazarenko, L., Ruedy, R., M. Sato, J. Willis, A. Del Genio, D Koch, A. Lacis, K. Lo, S. Menon, T. Novakov, J. Perlwitz, G. Russell, G. Schmidt and N. Tausnev, 2005. Earth's energy imbalance: Confirmation and implications. *Science*, 308: 1431–1435.

Harris, G.R., D.M.H. Sexton, B.B.B. Booth, M. Collins, J.M. Murphy and M.J. Webb, 2006. Frequency distributions of transient regional climate change from perturbed physics ensembles of general circulation model simulations. *Clim. Dynam.*, 27: 357–375.

Harris, G.R., D.M.H. Sexton, B.B.B. Booth, M. Collins, and J.M. Murphy, 2013. Probabilistic projections of transient climate change. *Clim. Dynam.*, 40: 2937–2972.

Hegerl, G.C., T.J. Crowley, W.T. Hyde, and D.J. Frame, 2006. Climate sensitivity constrained by temperature reconstructions over the past seven centuries. *Nature*, 440: 1029–1032.

Jaeger, C.C., and J. Jaeger, 2011. Three views of two degrees. *Reg. Env. Change*, 11, S15–S26.

Jewson, S., 2013. Methods for the inclusion of parameter uncertainty in weather and climate forecasts. Presentation at the European Meteorological Society 11th European Conference on the applications of meteorology. Available at: http://presentations.copernicus.org/EMS2013-151_presentation.pdf.

- Jones, G.S., P.A. Stott and N. Christidis, 2013. Attribution of observed historical near surface temperature variations to anthropogenic and natural causes using CMIP5 simulations. *J. Geophys. Res. Atmos*, doi:10.1002/jgrd.50239.
- Knutti, R., T.F. Stocker, F. Joos and G.-K. Plattner, 2002. Constraints on radiative forcing and future climate change from observations and climate model ensembles. *Nature*, 416: 719–723.
- Knutti, R. and G.C. Hegerl, 2008. The equilibrium sensitivity of the Earth's temperature to radiation changes. *Nature Geosci.*, 1: 735–743.
- Levitus, S., J. Antonov, T. Boyer and C Stephens, 2000. Warming of the world ocean, *Science*, 287: 5641.2225–2229.
- Lewis, N., 2013. An objective Bayesian, improved approach for applying optimal fingerprint techniques to estimate climate sensitivity. *J. Clim.*, 26: 7414–7429.
- Libardoni, A.G. and C. E. Forest, 2011. Sensitivity of distributions of climate system properties to the surface temperature dataset. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L22705.
- Libardoni, A.G. and C. E. Forest, 2013. Correction to 'Sensitivity of distributions of climate system properties to the surface temperature dataset'. *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/grl.50480.
- Lin, B., L. Chambers, P. Stackhouse Jr., B. Wielicki, Y. Hu, P. Minnis, N. Loeb, W. Sun, G. Potter, Q. Min, G. Schuster and T.-F. Fan, 2010: Estimations of climate sensitivity based on top-of-atmosphere radiation imbalance. *Atmos. Chem. Phys.*, 10: 1923–1930.
- Lindzen, R.S. and Y.S. Choi, 2009. On the determination of climate feedbacks from ERBE data. *Geophys. Res. Lett.* 36, L16705.
- Lindzen, R.S. and Y.S. Choi, 2011. On the observational determination of climate sensitivity and its implications. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 47: 377–390.
- Loeb, N.G., J.M. Lyman, G.C. Johnson, R.P. Allan, D.R. Doelling, T. Wong, B.J. Soden and G.L. Stephens, 2012. Observed changes in top-of-the-atmosphere radiation and upper-ocean heating consistent within uncertainty. *Nature Geoscience.*, 5: 110–113.

Een gevoelige kwestie

Masters, T., 2013. Observational estimate of climate sensitivity from changes in the rate of ocean heat uptake and comparison to CMIP5 models. *Clim. Dyn.*, DOI 10.1007/s00382-013-1770-4

Murphy, D.M., S. Solomon, R.W. Portmann, K.H. Rosenlof, P.M. Forster and T. Wong, 2009. An observationally based energy balance for the Earth since 1950. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 114: D17107.

Olson, R., R. Sriver, M. Goes, N.M. Urban, H.D. Matthews, M. Haran and K. Keller, 2012. A climate sensitivity estimate using Bayesian fusion of instrumental observations and an Earth System model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 117: D04103.

Otto, A., F. E. L. Otto, O. Boucher, J. Church, G. Hegerl, P. M. Forster, N. P. Gillett, J. Gregory, G. C. Johnson, R. Knutti, N. Lewis, U. Lohmann, J. Marotzke, G. Myhre, D. Shindell, B. Stevens and M. R. Allen, 2013. Energy budget constraints on climate response. *Nature Geosci.*, 6: 415–416.

Paleosens Members, 2012. Making sense of palaeoclimate sensitivity. *Nature*, 491: 683–691.

Ring, M.J., D. Lindner, E.F. Cross, and M.E. Schlesinger, 2012. Causes of the global warming observed since the 19th century. *Atmos. Clim. Sci.*, 2: 401–415.

Schlesinger, M., H. Kheshgi, J. Smith, F. de la Chesnaye, J.M. Reilly, T. Wilson, and Ch. Kolstad, 2007. *Human-induced Climate Change: An Interdisciplinary Assessment*. Cambridge University Press.

Schwartz, S.E., 2012. Determination of Earth's transient and equilibrium climate sensitivities from observations over the twentieth century: Strong dependence on assumed forcing. *Surv. Geophys.*, 33: 745–777.

Sexton, D.M. H., J.M. Murphy, M. Collins and M.J. Webb, 2012. Multivariate probabilistic projections using imperfect climate models. Part I: outline of methodology. *Clim. Dynam.*, 38: 2513–2542.

Soden, B.J. and I.M. Held, 2006. An assessment of climate feedbacks in coupled ocean-atmosphere models. *J. Clim.*, 19: 3354–3360.

Tol, R.S.J., 2007. Europe's long-term climate target: A critical evaluation. *Energy Policy*, 35: 424–432.

Tomassini, L., P. Reichert, R. Knutti, T.F. Stocker, and M.E. Borsuk, 2007. Robust Bayesian uncertainty analysis of climate system properties using Markov chain Monte Carlo methods. *J. Clim.*, 20: 1239–1254.

Van der Sluijs, J.P., J.C.M. van Eijndhoven, B. Wynne, and S. Shackley, 1998. Anchoring devices in science for policy: The case of consensus around climate sensitivity. *Soc. Studies Sci.*, 28; 2: 291–323.

VonderHaar, T.H., J.L. Bytheway, and J. M. Forsythe, 2012. Weather and climate analyses using improved global water vapor observations. *Geophys. Res. Lett.*, 39: L15802, doi:10.1029/2012GL052094.

