

Klimaatkantelpunten: hoeveel opwarming kunnen wij aan?



De aarde warmt op, dat weten we inmiddels. Sinds het begin van het industriële tijdperk is de gemiddelde temperatuur op aarde 1,1 graad gestegen. Toch zegt de opwarming van de globaal gemiddelde temperatuur nog niet zo veel over de (lokale) gevolgen. Voorbeelden van extreme weersomstandigheden zien we steeds vaker, zoals bosbranden in Zuid-Europa, hittegolven in Canada en overstromingen in Limburg en Duitsland. Het is niet altijd makkelijk om een enkele gebeurtenis direct aan klimaatverandering toe te wijzen, omdat weersituaties zeer variabel kunnen zijn en er ook zonder klimaatverandering extreme situaties voorkomen. Tegelijkertijd kunnen we de laatste jaren steeds sneller wetenschappelijk onderbouwde antwoorden geven rondom de attributie van weersextremen aan klimaatverandering [1]. Aan de andere kant kunnen (sterke) veranderingen in de hoeveelheid weersextremen wijzen op het overschrijden van een kantelpunt. Hoeveel warmer mag het nog worden voordat het risico voor 'gevaarlijke' gevolgen van klimaatverandering te groot wordt? Is er een drempelwaarde van de mondiaal gemiddelde opwarming die bij overschrijden onomkeerbaar gedrag veroorzaakt?

Kantelpunten

Deze en gerelateerde vragen hebben te maken met kantelpunten in het klimaatstelsel. Eigenschappen van kantelpunten zijn: (i) bij overschrijding van een drempelwaarde van een externe aandrijving of parameter ondergaat het stelsel een abrupte, kwalitatieve verandering en (ii) als de 'aandrijving' weer teruggebracht wordt onder de drempelwaarde keert het stelsel niet (direct) terug in zijn oorspronkelijke toestand (hysterese). Wiskundig beschreven is deze simpelste vorm van kantelpunten een dynamisch systeem, waarin in een scala van één parameter, twee kwalitatief verschillende evenwichtstoestanden tegelijkertijd bestaan. Een energiebalansmodel voor de mondiaal gemiddelde temperatuur T vertoont dit gedrag als de planetaire albedo, α , (niet-lineair) afhankelijk is van de temperatuur (figuur 1):

$$\frac{dT}{dt} = Q_0(1 - \alpha(T)) -$$

$$A \ln\left(\frac{pCO_2}{pCO_2^{ref}}\right) - \epsilon(T)\sigma T^4 \quad (1)$$

De eerste term in deze vergelijking beschrijft de zonne-instraling Q_0 minus de gereflecteerde straling, de tweede term representeert het broeikaseffect met de atmosferische CO_2 -concentratie, pCO_2 , ten opzichte van een referentie pCO_2^{ref}

(met A een constante), en de laatste term beschrijft de uitgaande straling volgens de Boltzmannwet met de Boltzmannconstante, σ , en de planetaire (temperatuurafhankelijke) emissiviteit, ϵ . Dit model kent twee evenwichtstoestanden, 'ijsbedekte' en 'ijsvrije' aarde, die voor een bepaald scala aan CO_2 -concentraties tegelijkertijd kunnen voorkomen (figuur 1). Toevoeging van een temperatuurafhankelijke emissiviteit (wolkenvorming) leidt in dit model tot verschillende hellingen van de ijsbedekte (blauw in figuur 1) en ijsvrije (rood in figuur 1) takken [2].

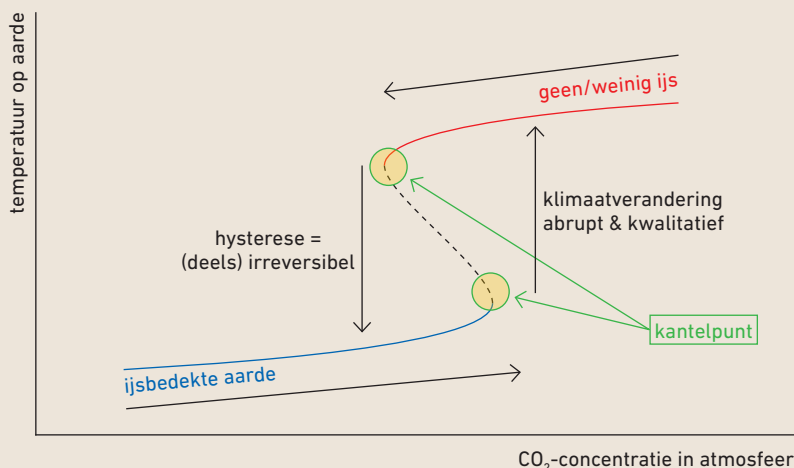
In complexe systemen bestaan meer vormen van kantelpunten: De transitie kan gedreven zijn door fluctuaties en daardoor niet alleen op een vaste parameterwaarde gebeuren. Er kunnen transities naar oscillerende evenwichten plaatsvinden. Of de aard van de transitie kan afhangen van de snelheid waarmee de aandrijving veranderd wordt (*rate-induced tipping*) [3]. In dynamische systemen met (heterogene) ruimtelijke dimensies kan een deel van het domein al in transitie zijn, terwijl een ander deel nog niet zo ver is [4].

Hoe voorspellen we klimaatopwarming?

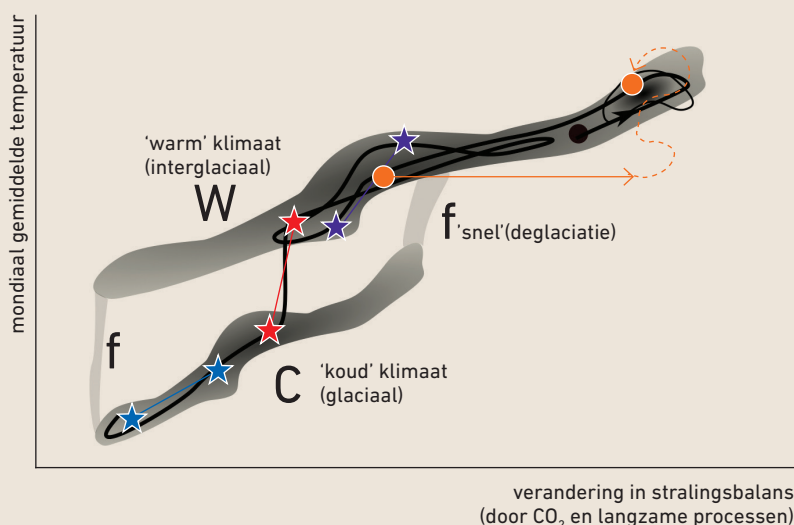
De zogenoemde klimaatgevoeligheid geeft aan hoeveel opwarming (mondiaal gemiddeld) te verwachten is na een abrupte verdubbeling van CO_2 in de at-



Anna von der Heydt promoveerde in Twente op turbulentie en is nu universitair hoofddocent bij het Instituut voor Marien en Atmosferisch onderzoek (IMAU) in Utrecht. Ze kreeg recentelijk een Vici-beurs voor onderzoek naar klimaatkantelpunten. A.S.vonderHeydt@uu.nl



Figuur 1. Schematische weergave van een kantelpunt volgens het energiebalans model in vergelijking (1). Bij overschrijding van een drempelwaarde van een externe aandrijving ondergaat het systeem een abrupte, kwalitatieve verandering (verticale pijl rechts); als de controle parameter (CO₂-concentratie in dit geval) weer teruggebracht wordt onder de drempelwaarde keert het systeem niet (direct) terug in zijn oorspronkelijke toestand (verticale pijl links).



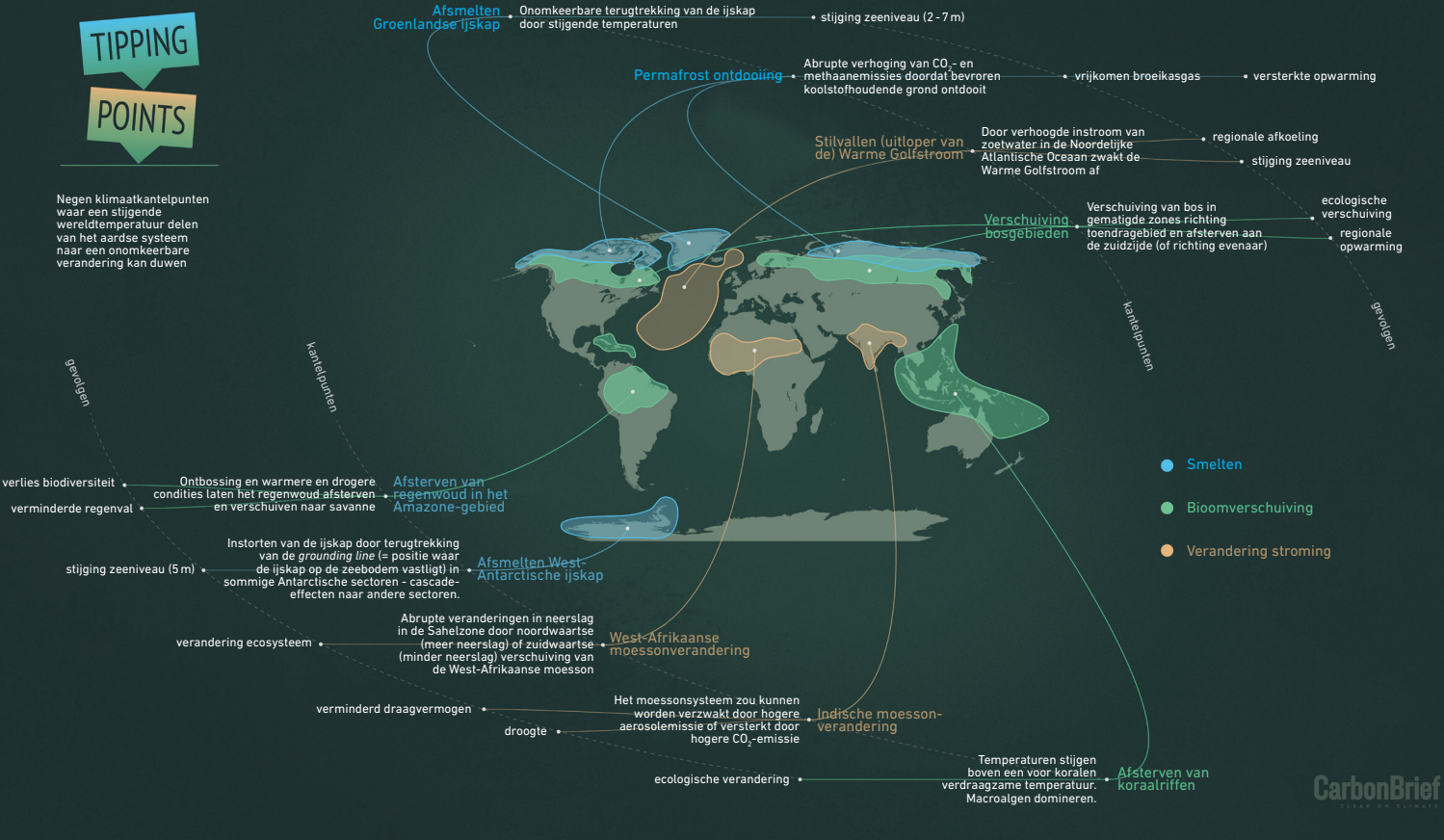
Figuur 2. Schematische weergave van een 'klimaatattractor' als relatie tussen de mondiaal gemiddelde temperatuur en stralingsaandrijving (door CO₂-concentratie en eventuele langzame processen zoals ijsbedekking, vegetatie et cetera). Een (hypothetische) lange tijdsreeks zou zich binnen het grijs getinte gebied bewegen (zwarte lijn is een 'trajectorie'). Door twee punten (willekeurig gekozen) van de tijdsreeks met elkaar te vergelijken kunnen we de '2-punts-klimaatgevoeligheid' schatten. Liggen de twee punten in het warme gedeelte van de attractor (paarse symbolen), dan resulteert dit doorgaans in grotere klimaatgevoeligheid dan in het 'koude' gedeelte (blauwe symbolen). Extreme waarden van de klimaatgevoeligheid ontstaan als twee punten uit verschillende gebieden met elkaar vergeleken worden (rode symbolen). De oranje symbolen en pijlen symboliseren een abrupte verandering in CO₂ zoals in klimaatmodellen gebeurt: het klimaat raakt tijdelijk uit evenwicht en stabiliseert op termijn langs een onbekend traject (stippellijn) in een nieuw evenwicht. Figuur gemodificeerd uit [7].

mosfeer [5]. Dit getal kan op verschillende manieren bepaald worden: (i) met klimaatmodellen die de fysische processen van het wereldklimaat beschrijven, (ii) uit observaties van de laatste ongeveer honderd jaar en (iii) uit reconstructies van het klimaat en CO₂-concentraties uit het verleden. De recentste evaluatie van de verschillende methodes om klimaatgevoeligheid te bepalen geeft een 'likely' (in termen van IPCC > 66% waarschijnlijkheid) bereik van 2,3 tot 4,5 graden opwarming [6]. Elk van de drie methoden draagt bij aan de onzekerheid op dit getal. De onzekerheidsmarge is echter deels ook gegeven door de klimaatdynamica zelf: in een oorspronkelijk kouder klimaat spelen bijvoorbeeld andere feedbackprocessen een rol dan in een oorspronkelijk warmer klimaat. Deze toestandsafhankelijkheid kan het beste geïllustreerd worden in een 'fasediagram' of de 'klimaatattractor', zie figuur 2. Een hypothetische lange tijdsreeks (trajectorie) van mondiaal gemiddelde temperatuur en CO₂-concentratie zou zich altijd binnen het grijs getoonde gebied in figuur 2 bewegen. Vergelijken we twee evenwichtspunten op een traject met elkaar in het 'warme' klimaat in dit diagram, dan kunnen we de klimaatgevoeligheid schatten door de helling tussen de twee punten te bepalen. Doen we hetzelfde in het 'koude' gebied van de attractor, dan komen we uit op een andere schatting van de richtingscoëfficiënt.

De klimaatgevoeligheid is op verschillende manieren een lineaire maat. Eventuele kantelpunten kunnen niet meegenomen worden omdat de klimaatgevoeligheid oneindig groot zou worden op het kantelpunt zelf. Als we in figuur 2 punten uit twee verschillende 'regio's' op de attractor met elkaar vergelijken (zonder te weten dat tussen de twee tijdstippen een transitie heeft plaatsgevonden), dan leidt dat meestal tot bijzonder grote schattingen van de klimaatgevoeligheid [2,7].

Klimaatkantelpunten

In het klimaatsysteem kennen we verschillende kantelpunten [8], waarbij een onderdeel van het klimaatsysteem



Figuur 3. Negen klimaatkantelpunten die bij opwarming van de aarde overschreden kunnen worden en abrupte en onomkeerbare veranderingen kunnen veroorzaken. Illustratie: Rosamund Pearce/Tom Prater.

abrupt en onomkeerbaar kan veranderen bij overschrijding van bijvoorbeeld een zekere mondiale opwarming. Voorbeelden daarvan zijn het snelle afsmelten van de Groenlandse of Antarctische ijskappen, het stilvallen van de uitloper van de Warme Golfstroom of het verdwijnen van tropisch regenwoud in het Amazonegebied [9], zie negen belangrijke voorbeelden in figuur 3.

Vaak karakteriseren we kantelpunten in termen van mondiale opwarming, maar voor sommige kantelpunten ligt de directe drempelwaarde bij een andere grootte (meestal gerelateerd aan mondiale opwarming); de Warme Golfstroom reageert bijvoorbeeld op de grootte en snelheid van de toevoer van zoet (smelt)water in de Noord-Atlantische Oceaan [10]. De toestand van het regenwoud in het Amazonegebied hangt af van (seizoensafhankelijke) neerslag- en droogteperiodes. Aanvankelijk schatten IPCC-rapporten in dat het risico op het overschrijden van dit soort kantelpunten pas relevant

zou worden bij een wereldgemiddelde opwarming van 5°C of meer. Nieuwe inzichten in twee recente IPCC-rapporten laten echter zien dat er al een aanzienlijke kans op overschrijding van enkele van de kantelpunten bestaat bij een opwarming van 1-2°C [11,12]. Het doel van het Parijsakkoord uit 2015 om de mondiale opwarming tot 1,5°C te beperken krijgt daardoor extra urgentie [13].

IJskappen

De meeste kantelpunten met een drempelwaarde tussen de 1-2°C opwarming zijn gerelateerd aan het smelten van ijs op land of op zee [14]. Observaties van de West-Antarctische ijskap over de afgelopen jaren doen vermoeden dat het onomkeerbaar terugtrekken van ijs al gaande is in de Amundsen Zee [11]. Dit betekent dat voor dit deel van de ijskap een kantelpunt mogelijk al overschreden is. Bovendien laten modelstudies zien dat het verdwijnen van een gedeelte van de ijskap kan leiden tot het destabiliseren

van de gehele West-Antarctische ijskap [15]. Delen van de Oost-Antarctische ijskap zijn gevoelig voor vergelijkbare instabiliteitsmechanismen en het afsmelten hiervan kan leiden tot een wereldgemiddelde zeespiegelstijging van drie tot vier meter over een periode van honderd jaar of meer [11]. Ook de Groenlandse ijskap smelt steeds sneller en modelstudies laten een drempelwaarde zien voor het onomkeerbaar afsmelten ervan van ongeveer 1,5°C opwarming. Als de gegeven drempelwaarden voor ijskappen maar niet bereikt worden, gaat het smelten relatief traag. Bij een opwarming van 1,5°C, moeten we op ongeveer tien meter zeespiegelstijging in tienduizend jaar rekenen. Bij meer dan 2°C opwarming kan het al stukken sneller gaan, namelijk met tien meter in duizend jaar [16].

Biosfeer

Een aantal kantelpunten zijn gerelateerd aan de biosfeer. Zo wordt bijvoorbeeld het regenwoud in het

“In het klimaatsysteem kennen we verschillende kantelpunten, waarbij een onderdeel van het klimaatsysteem abrupt en onomkeerbaar kan veranderen bij overschrijding van bijvoorbeeld een zekere mondiale opwarming.”

Amazonegebied door ontbossing en mondiale opwarming onder druk gezet, met destabilisatie en onomkeerbare verandering van regenwoud naar savanne als mogelijk resultaat voor grote delen van dit gebied. Niet alleen leeft tegenwoordig één op de tien bekende dier- en plantsoorten op aarde in het Amazonegebied, ook neemt het regenwoud grote hoeveelheden CO₂ op. Bij het verdwijnen van het regenwoud komt dus ook een extra hoeveelheid CO₂ vrij, die nu is opgeslagen in biomassa. Dit zal de mondiale opwarming verder versterken [17].

Cascades van kantelpunten

De drempelwaardes voor individuele kantelpunten zijn al vrij onzeker, maar geen van de hierboven beschreven kantelpunten staat los van elkaar, omdat verschillende componenten van het klimaatsysteem elkaar beïnvloeden. Ook hebben niet alle kantelpunten een directe invloed op de gemiddelde temperatuur op Aarde; de uitloper van de Warme Golfstroom verdeelt bijvoorbeeld vooral warmte tussen de evenaar en hogere breedtegraden, maar een stilvallen zal niet direct leiden tot toe- of afname van de wereldgemiddelde temperatuur. Doordat de kantelpunten elkaar beïnvloeden, kunnen cascades van kantelpunten ontstaan. Het smelten van de Groenlandse ijskap resulteert niet alleen in zeespiegelstijging, maar ook in zoetwatertoevoer in

de Noord-Atlantische Oceaan, wat weer een belangrijke factor voor de stabiliteit van de Warme Golfstroom is. Veel en snelle toevoer van zoet water kan dus de Warme Golfstroom aan zijn drempelwaarde brengen voor stilvallen. De mogelijke gevolgen van het stilvallen van de uitloper van de Warme Golfstroom zijn niet alleen lokaal, zoals afkoeling van het Noord-Atlantisch gebied, maar kunnen ook mondiaal zijn, zoals veranderingen in neerslagpatronen boven Zuid-Amerika en passaatwinden in de tropen. Deze veranderingen kunnen weer andere onderdelen van het klimaatsysteem met een kantelpunt beïnvloeden, bijvoorbeeld de El Niño-variabiliteit [19] of het ecosysteem van het Amazonegebied [17]. De mogelijkheid van kantelpunt-cascades geeft bovendien aan dat onomkeerbare klimaatveranderingen als gevolg van kantelpunten al kunnen optreden bij een wereldgemiddelde opwarming minder dan voor individuele kantelpunten geschat [20], omdat een cascade begint bij de component met de kleinste drempelwaarde (bijvoorbeeld het afsmelten van de Groenlandse ijskap), en de volgende kantelpunten dan kunnen worden bereikt door consequenties van deze eerste transitie en niet noodzakelijkerwijs als gevolg van de mondiaal gemiddelde temperatuurstijging. Een voorbeeld is het stilvallen van de Warme Golfstroom door toevoer van

Groenlands smeltwater. Aan de andere kant is het ook mogelijk dat systemen gestabiliseerd worden door het overschrijden van andere kantelpunten. Met name naar de wisselwerking tussen verschillende kantelpuntssystemen is daarom nog veel onderzoek nodig.

REFERENTIES

- 1 www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/snelle-duiding-van-extreem-weer.
- 2 P. Ashwin en A.S. von der Heydt, *Extreme Sensitivity and Climate Tipping Points*, *Journal of Statistical Physics* **370**, 1166-24 (2019).
- 3 P. Ashwin et al., *Tipping points in open systems: Bifurcation, noise-induced and rate-dependent examples in the climate system*, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **370**, 1166-1184 (2012).
- 4 R. Bastiaansen, H.A. Dijkstra en A.S. von der Heydt, *Fragmented tipping in a spatially heterogeneous world*, *Environmental Research Letters* **14**, 045006 (2022).
- 5 www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/hoe-gevoelig-is-het-klimaat.
- 6 S. Sherwood et al., *An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence*, *Reviews of Geophysics* **58**, e2019RG000678 (2020).
- 7 A.S. von der Heydt en P. Ashwin, *State dependence of climate sensitivity: attractor constraints and palaeoclimate regimes*, *Dynamics and Statistics of the Climate System* **1**, 1-21 (2016).
- 8 www.klimaatdesk.org/answers/vanaf-welke-temperatuurstijging-zijn-de-klimaatveranderingen-onomkeerbaar.
- 9 T.M. Lenton et al., *Tipping elements in the Earth's climate system*, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**(6), 1786-1793 (2008).
- 10 www.klimaatdesk.org/answers/welke-rol-speelt-de-warme-golfstroom-voor-het-klimaat-in-nederland.
- 11 H.-O. Pörtner et al. (eds.), *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a changing climate* (2019).
- 12 V. Masson-Delmotte et al. (eds.), *Global Warming of 1.5°C*, *An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (2019).
- 13 T.M. Lenton et al., *Climate tipping points - too risky to bet against*, *Nature*, **575**(7784), 592-595 (2019).
- 14 H.J. Schellnhuber et al., *Why the right climate target was agreed in Paris*, *Nature Climate Change*, **6**(7), 649-653 (2016).
- 15 J. Feldmann en A. Levermann, *Collapse of the West Antarctic Ice Sheet after local destabilization of the Amundsen Basin*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **112**(46), 14191-14196 (2015).
- 16 A. Aschwanden et al., *Contribution of the Greenland Ice Sheet to sea level over the next millennium*, *Science Advances*, **5**(6), eaav9396 (2019).
- 17 T.E. Lovejoy en C. Nobre, *Amazon tipping point: Last chance for action*, *Science Advances*, **5**(12), eaab2949 (2019).
- 18 P. Cox et al., *Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model*, *Nature* **408**, 184-187 (2000).
- 19 M.M. Dekker, A.S. von der Heydt en H.A. Dijkstra, *Cascading transitions in the climate system*, *Earth System Dynamics* **9**, 1243-1260 (2018).
- 20 N. Wunderling et al., *Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming*, *Earth System Dynamics*, **12**(2), 601-619 (2021).