

---

## De voorspelbaarheid van klimaatverandering is begrensd

De Brownse beweging werd voor het eerst beschreven door, men kan het vermoeden, Robert Brown (1773-1858). In 1827 bestudeerde hij het gedrag van stuifmeelkorrels in een vloeistof, en stelde vast dat ze een onregelmatige beweging vertoonden terwijl het toch 'dode materie' betrof. Later werd duidelijk dat het gaat om de voortdurende, maar onregelmatige beweging van moleculen, die door overdracht van impuls het Brownse deeltje een willekeurige pad laten beschrijven. Einstein ving het allemaal netjes in een wiskundige formulering en liet onder andere zien, dat de standaardafwijking van de positie ten opzichte van de uitgangssituatie toeneemt met de wortel uit de verstreken tijd.

Wat heeft dit nu te maken met de klimaatproblematiek? Stilstaan bij de Brownse beweging is een goede manier om ons te realiseren, dat begrip niet automatisch leidt tot voorspelbaarheid. Het mechanisme van de Brownse beweging begrijpen we tot in detail, maar we kunnen de baan van een individueel deeltje niet voorspellen.

Edward N. Lorenz, die in 2005 de Buys Ballotmedaille kreeg, heeft uitgebreid onderzoek gedaan naar de voorspelbaarheid van weer en klimaat (e.g. Lorenz, 1976). Hij ontdekte onder andere dat een dynamisch systeem met maar drie toestandvariabelen, gekoppeld door betrekkelijk simpele differentiaalvergelijkingen, chaotisch gedrag kan vertonen. Het voert hier te ver om een samenvatting van Lorenz' studies te geven, maar enkele aspecten kunnen wel genoemd worden. Zo vond Lorenz dat in een systeem, waarin veel instabiliteiten optreden, kleine veranderingen in een begintoestand, of kleine veranderingen in de modelparameters, kunnen leiden tot een sterk afwijken-

de evolutie. Voortbordurend op de ideeën van Lorenz worden in de weersverwachting tegenwoordig zogenaamde ensemble-forecasts gemaakt, waarbij de ontwikkeling van de toestand van de atmosfeer voor de komende tien dagen maar liefst 51 keer uitgerekend wordt met licht verschillende begincondities. Het resultaat hiervan is op de website van bijvoorbeeld het KNMI dagelijks te zien. Soms lijken de 51 verwachtingen op elkaar, soms lopen ze erg uiteen: de voorspelbaarheid varieert blijkbaar sterk.

### **Begrip leidt niet altijd tot voorspelkracht**

Het werk van Lorenz laat zien, dat er in niet-lineaire systemen vaak sprake is van quasi-chaotisch gedrag. In de oplossingsruimte bestaat dan een structuur met gebieden, waarin het systeem zich bij voorkeur bevindt. Het is echter moeilijk te voorspellen wanneer het systeem van de ene voorkeurstoestand naar de andere overgaat. De 'voorspelhorizon' is dan beperkt, dat wil zeggen dat, ondanks een goede beschrijving van de begintoestand, de evolutie van een systeem slechts voor een relatief korte tijd voorspeld kan worden. Voor de dynamica van de atmosfeer op tijdschalen van dagen tot maanden is dit evident. Als we naar langere tijdschalen kijken (het klimaat), ligt het wat genuanceerder.

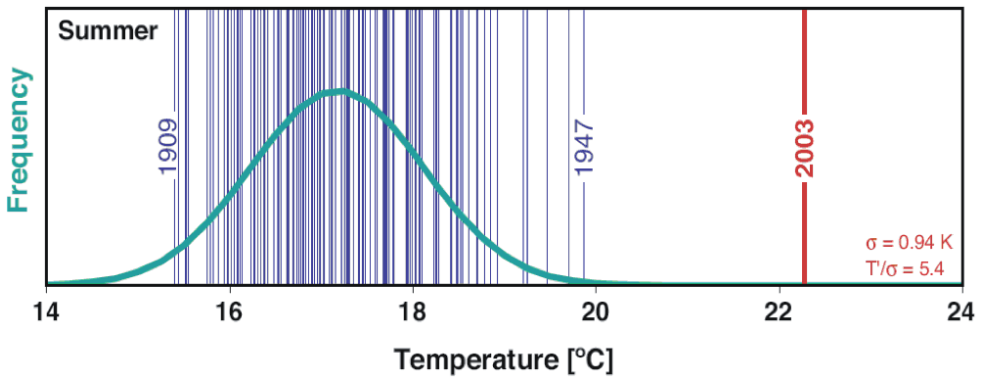
In het geval van het klimaatsysteem kan men misschien optimisme putten uit het feit, dat kleine veranderingen in de externe forcering wellicht slechts leiden tot kleine verschuivingen van de voorkeursgebieden in de oplossingsruimte. De structuur van de oplossingsruimte blijft dan grotendeels intact en het systeem wordt ook niet onmiddellijk in een andere voorkeurstoestand gedwongen. Maar het is moeilijk vast te stellen wat 'klein' in dit verband nou eigenlijk is!

### **Verrassingen zullen blijven komen**

Extreme weersomstandigheden worden tegenwoordig breed uitgemeten, en ook al gauw uitgelegd als een bewijs voor het voorspelde patroon van klimaatverandering. In vrijwel alle gevallen ontbreekt daarvoor wetenschappelijk bewijs. Het voorspellen van veranderingen in de statistiek van extreme weersomstandigheden is een hachelijke zaak, en hier is het vertrouwen in modelresultaten misplaatst. Een kritische beschouwing leert dat klimaatmodellen moeite hebben met het genereren van langdurige 'afwijkingen van het gemiddelde' weer met een tijdschaal van 10 tot 50 jaar. Ik geef twee voorbeelden om dit punt te illustreren.

Sinds ongeveer 1982 zijn de zomertemperaturen in midden-Europa opvallend hoog geweest, met als absolute uitschieter de zomer van 2003. In Zwitserland lag de gemiddelde zomertemperatuur voor de periode 1981-2005 meer dan een graad hoger dan in de periode 1955-1980. De gevolgen zijn bekend: sterk terugtrekkende gletsjers en ont-dooiende permafrost met alle gevolgen van dien. Figuur 1 is een fascinerend plaatje. Het laat de gemiddelde zomertemperaturen in Zwitserland zien voor een groot aantal jaren, en een normale verdeling die het best bij deze waarnemingen past. De anomalie in de zomertemperatuur van 2003 was 5.4 maal de standaardafwijking. Mijn tabel van

de error-functie is te onnauwkeurig om de bijbehorende overschrijdingskans te geven, maar deze ligt zeker in de orde van één op de paar honderdduizend jaar. Zijn we dan getuige geweest van een zeer uitzonderlijke gebeurtenis? Of is een extreme zomer eigenlijk veel waarschijnlijker dan we denken, bijvoorbeeld omdat er positieve terugkoppelingen aan het werk zijn die we niet kennen? [Achteraf is gesuggereerd, dat in het geval van de hete zomer van 2003 de koppeling tussen energiebalans en bodemvocht van doorslaggevende betekenis is geweest]. Het is mij een raadsel, hoe sommige wetenschappers menen te kunnen concluderen dat de extreme zomer van 2003 voor 75% het gevolg is van menselijke invloed op het klimaat (Anderson and Bausch, 2006).



Figuur 1: Verdeling van de zomertemperatuur in Zwitserland (Schär et al., 2004). De groene curve geeft de normale verdeling met de waargenomen gemiddelde temperatuur en standaardafwijking.

Mijn tweede voorbeeld betreft het zeeijs in de Arctische oceaan. De sterke afname van de omvang van het zeeijs aan het eind van de zomer gedurende de laatste jaren is dramatisch te noemen. De droom van Willem Barentsz (de arctische route naar Japan) gaat hiermee toch nog tamelijk onverwacht in vervulling. De snelheid, waarmee het ijsoppervlak afneemt, is ruwweg drie maal zo groot als wat klimaatmodellen hebben voorspeld op grond van realistische broeikasforcering. Ook hier geldt blijkbaar dat er terugkoppelingsmechanismen zijn die we niet kennen, of waarvan we de sterkte in ieder geval flink onderschatten. Overigens zullen er nu spoedig modellen komen die de afname wel kunnen simuleren, want klimaatmodellen bieden voldoende 'vrijheid' om ze hiertoe af te regelen. In principe kunnen klimaatmodellen op deze manier verbeterd worden (en dat is eigenlijk ook de gangbare aanpak), maar deze methodiek is pragmatisch en leidt er niet toe dat we verrassingen vóór kunnen zijn.

Al met al zullen we rekening moeten houden met het feit, dat klimaatschommelingen van regionale aard op een tijdschaal van enkele tientallen jaren nauwelijks voorspelbaar zijn. Dit geldt voor een wereld met of zonder versterkt broeikas effect.

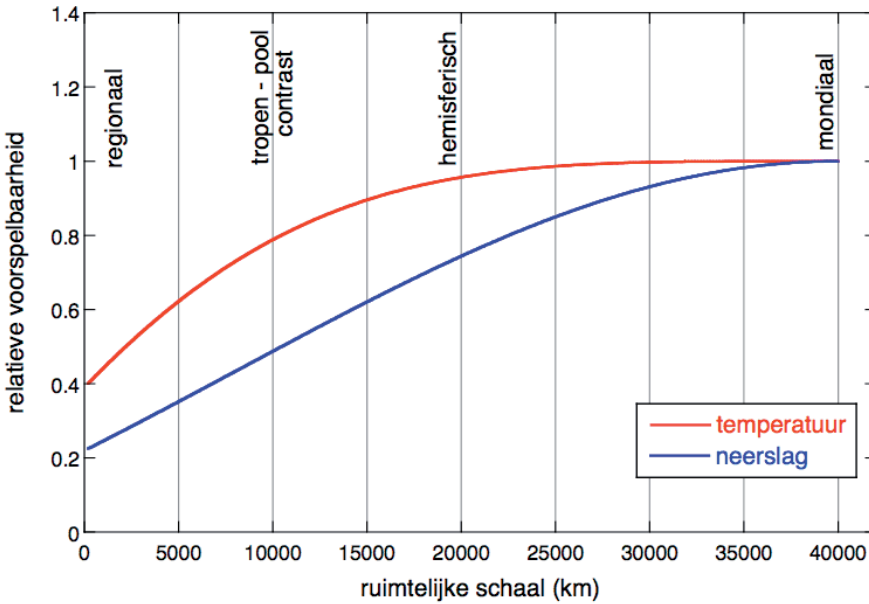
## Klimaatvoorspellingen

Er worden tegenwoordig zeer veel studies gedaan naar de impact van klimaatveranderingen op natuurlijke systemen en de gevolgen hiervan voor de maatschappij. In eerste instantie werden dit soort studies gepresenteerd als ‘scenario-studies’, dat wil zeggen studies waarin voorzichtig onderzocht wordt wat er eventueel zou kunnen gebeuren. Dit stadium is echter al lang gepasseerd, en er worden nu allerlei complexe modellen, die sociaal-economische processen koppelen aan beschrijvingen van infrastructuur, waterhuishouding, energievoorziening, stofstromen enz., aangedreven met projecties van het toekomstige klimaat. De resultaten van deze aanpak worden meer en meer gebruikt als instrument voor beleid. De vraag, of dit zin heeft, wordt te weinig gesteld. Ik wil twee kanttekeningen maken.

(1) De gebruikte modellen zijn complex in de zin dat er zeer veel niet-lineaire koppelingen zijn tussen allerlei variabelen. De voorspelbaarheid wordt hierdoor fundamenteel begrensd (zoals eerder betoogd voor atmosferische modellen). Dit wordt echter nauwelijks onderzocht, omdat de uitkomst wel eens haaks zou kunnen staan op het idee, dat de maatschappij ook op langere termijn maakbaar is. De uitkomst zou ook het geloof aan kunnen tasten, dat deterministische modellen zullen leiden tot een recept, dat via economisering en marktwerking het klimaatprobleem voor ons op zal lossen. Ik maak graag een vergelijking met de historische wetenschap. Duizenden historici hebben de geschiedenis van de mensheid bestudeerd, vastgelegd en geanalyseerd. Toch zijn er maar weinigen onder deze historici, die het aan zouden durven om een gedetailleerde voorspelling te doen over hoe het met deze mensheid in de komende honderd jaar zal gaan. Uitspraken beperken zich tot zeer algemene, zoals de mondiale demografische ontwikkeling in de komende 50 jaar (analogon: ‘de wereldgemiddelde temperatuur’), of een geleidelijke verschuiving van economische machtsblokken (analogon: ‘de polen warmer sterker op dan de rest van de aarde’). De historicus weet dat er steeds weer onvoorziene gebeurtenissen plaatsvinden, die in eerste instantie onbelangrijk lijken, maar dan soms een proportie krijgen waardoor de loop der geschiedenis op zijn kop gezet wordt.

(2) De antwoorden van modellen, waarmee de impact van klimaatverandering wordt bestudeerd, kunnen nooit beter zijn dan de input. Hier lopen we aan tegen het probleem, dat de voorspelbaarheid van klimaatverandering afhangt van de ruimtelijke schaal. Op mondiale schaal bekeken kunnen we er vrij zeker van zijn dat de temperatuur zal toenemen, en dat de hydrologische cyclus zal intensiveren. Maar zodra het komen en gaan van depressies en hogedrukgebieden de dienst uitmaakt wordt het allemaal een stuk onzekerder. Regionale klimaatvoorspellingen, waarbij gepoogd wordt om verschillen over een afstand van duizend tot enkele duizenden kilometers te voorspellen, zijn niet betrouwbaar (er zijn althans geen wetenschappelijk argumenten of harde empirische gegevens waarmee aannemelijk gemaakt kan worden dat ze betrouwbaar zijn). Voor de variatie van veranderingen in neerslag en temperatuur met de breedte ziet het er wellicht iets gunstiger uit (Figuur 2). In het algemeen moet de

betrouwbaarheid van voorspelde neerslagveranderingen veel lager worden ingeschat dan de betrouwbaarheid van voorspelde temperatuur-veranderingen. Dit is inherent aan de manier waarop de dynamica van de atmosfeer werkt. Het hardnekkige idee, dat we min of meer zeker weten dat natte gebieden natter worden en droge gebieden droger, mist een degelijke onderbouwing. Veel impact-studies worden nu gebaseerd op uitvoergegevens van klimaatmodellen op een regionale schaal. Een typisch voorbeeld is de neerslag in een stroomgebied van een middelgrote rivier zoals de Rijn. Het is best interessant om het allemaal eens door te rekenen, maar de resultaten moeten toch als zeer vrijblijvend worden beschouwd.



*Figuur 2: Een schematische weergave van de betrouwbaarheid van klimaatvoorspellingen op een tijdschaal van 100 jaar, als functie van de ruimtelijke schaal. De curves tonen de relatieve voorspelbaarheid (dat wil zeggen ten opzichte van de waarde voor mondiaal gemiddelde grootheden).*

### **Ruime marges, een grote rol voor de overheid**

Hoe moeten we dan met klimaatverandering omgaan? Klimaatmodellen zullen beter worden, maar dit zal een langzame ontwikkeling zijn en de betrouwbaarheid van de projecties zal slechts geleidelijk beter worden. Verrassingen van het type zoals eerder besproken, zullen blijven komen. Hierbij komt de enorme onzekerheid, die samenhangt met sociaal-politieke factoren op wereldschaal.

Er is maar één antwoord mogelijk: het hanteren van ruime marges bij kustverdediging, waterhuishouding, energievoorziening, infrastructuur en landinrichting. Deze

marges kunnen niet bereikt worden door ‘economiseren’, waarbij uit een allesomvattend model en een beschikbaar budget rolt hoe de zaak aangepakt moet worden. Het heeft ook geen zin om honderden studies uit te laten voeren, en honderden rapporten te laten schrijven, over de invloed van regionale klimaatveranderingen die misschien wel, en misschien niet komen. Men moet niet de illusie hebben, dat het nut van grote investeringen op het gebied van kustverdediging, waterhuishouding, energievoorziening, infrastructuur en landinrichting economisch aan te tonen is.

Kortom, een overheid moet durven te investeren op grond van een algemene visie en haar gezag. Hiervoor heeft ze kennis nodig en moet ze deze ook zelf onderhouden. De adviesbureau-cultuur helpt hier niet, en privatiseren al evenmin.

### **Wat moet de wetenschap dan doen? Vooral meten!**

Verrassingen kunnen minder verrassend zijn als er een goed monitoring-systeem is om kritische componenten van het klimaatsysteem in de gaten te houden. Hiermee kan de voorspelbaarheid op een termijn van enkele tientallen jaren wezenlijk vergroot worden. Hierbij moet vooral gedacht worden aan (i) de chemische samenstelling van de atmosfeer, (ii) de toestand van de bodem wereldwijd, (iii) de dynamica en warmtehuishouding van de oceanen, (iv) het massabudget van gletsjers en ijskappen (zeespiegel). Men zou denken dat de bestaande meetprogramma’s in de behoefte voorzien – niets is minder waar. Vooral wat betreft (ii) en (iv) zijn de huidige programma’s beperkt.

Om een voorbeeld uit mijn eigen vakgebied te geven: er is in het afgelopen jaar veel commotie geweest over de Groenlandse ijskap: meer afsmelting, sneller stromende gletsjers waarmee het ijs naar zee gevoerd wordt. De commotie is op zich terecht, maar gebaseerd op beperkte en onvolledige datasets. Een inschatting van de bijdrage van de Groenlandse ijskap aan zeespiegelrijzing in de komende 50 jaar kan veel aan betrouwbaarheid winnen door nu te investeren in meetprogramma’s (in situ, maar ook vanuit de ruimte).

De veelheid aan meettechnieken vergt een goede methode voor data-assimilatie. Hierbij moeten klimaatmodellen een belangrijke rol spelen. Van technieken, die ontwikkeld zijn voor de numerieke weersverwachting (het zo goed mogelijk beschrijven van de toestand van de atmosfeer op een bepaald tijdstip binnen de context van een fysisch-mathematisch model), is nog veel te leren.

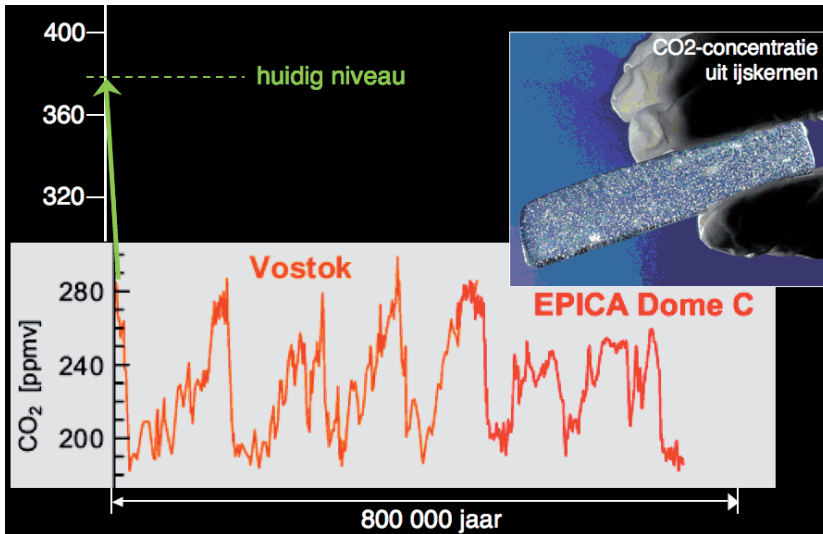
### **Er is wel een klimaatprobleem!**

In dit betoog heb ik vooral kritische geluiden laten horen, en mijn twijfel geuit over de manier waarop het klimaatbeleid tot stand komt. De indruk zou kunnen ontstaan dat ik vind dat er geen klimaatprobleem bestaat. Maar dat is er natuurlijk wel. De mens beïnvloedt de samenstelling van de atmosfeer enorm (in Figuur 3 geïllustreerd voor  $\text{CO}_2$ ). Dat is per definitie riskant, omdat we uit palaeoklimatologisch onderzoek weten dat kleine duwtjes tegen het klimaatsysteem soms enorme gevolgen kunnen hebben. Voorzichtigheid is dus geboden, en de wereldeconomie zal linksom of rechtsom zo

ingericht moeten gaan worden, dat de emissie van broeikasgassen sterk (en niet een beetje) beperkt wordt.

De afgelopen jaren is de aandacht voor het klimaat enorm toegenomen, maar veel meer dan de opbouw van een klimacratie heeft dat niet opgeleverd. In een tijd dat het accent steeds meer verschuift van inhoud naar verpakking, ook in de wetenschap, wordt het klimaatprobleem al snel omarmd door bedrijven en instanties, die weer een nieuwe smaak aan hun sauzenpalet kunnen toevoegen om hun product te verkopen.

Zoals gezegd is er daadkracht nodig van sterke overheden. Er bestaat niet zoiets als beheersbaarheid van het klimaat, daarvoor weten we veel te weinig van het systeem en is het waarschijnlijk ook te onvoorspelbaar. Het is ook niet vol te houden, om maatregelen te verkopen door het economisch nut ervan met zogenaamde harde cijfers aan te tonen. Het voorzorgprincipe is de laatste jaren nogal verguisd ('te weinig concreet om draagvlak te krijgen'), maar dat is onterecht. De motivatie om echt wat te doen kan toch alleen maar voortkomen uit een visie, gebaseerd op de wetenschap dat we hard tegen een systeem aan duwen dat misschien in een delicate balans is.



Figuur 3 Ontwikkeling van de CO<sub>2</sub>-concentratie in de atmosfeer gedurende de laatste 800 000 jaar, zoals gemeten in de luchtbelletjes van ijskernen (Siegenthaler et al., 2005). Het huidige niveau is ongeveer 375 ppmv (part per million by volume). Tijdens het Pleistoceen schommelde de concentratie tussen ~200 ppmv (ijstijd) en ~280 ppmv (inter-glaciaal).

## Referenties

Anderson J. and C. Bausch (2006) 'Climate Change and Natural Disasters: Scientific evidence of a possible relation between recent natural disasters and climate change'. *Briefing Note to the European Parliament* (IP/A/ENVI/FWC/2005-35).

- Lorenz E.N. (1976) 'Nondeterministic theories of climate change'. *Quaternary Research* 6, 495-506.
- Schär C., P.L. Vidale, D. Luthi, C. Frei, C. Haberli, A. Mark M.A. Liniger and C. Appenzeller (2004) 'The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves'. *Nature* 427, 332-336.
- Siegenthaler U. and 10 others (2005) 'Stable Carbon Cycle–Climate Relationship During the Late Pleistocene'. *Science* 310, 1313-1317.