

Zo vormen deze gassen een isolerende deken die ervoor zorgt dat de dampkring warmte kan vasthouden. Dankzij dit 'broeikas-effect' is het sinds het einde van de laatste ijstijd gemiddeld een aangename 15 graden Celsius op aarde. Zonder broeikasgassen zou het hier sterrenkoud zijn: gemiddeld min 18 graden.<sup>38</sup>

Dat er broeikasgassen in de lucht zitten, is dus een goede zaak: ze zorgen ervoor dat we niet in een wereld van louter sneeuw en ijs leven. Tyndall vermoedt eind negentiende eeuw al dat de concentratie van CO<sub>2</sub> van nature over periodes van duizenden jaren geleidelijk omhoog en omlaag schommelt, parallel aan de ijstijden en de warme-tussenperiodes.

Maar hoe precies? Dat begonnen steeds meer wetenschappers zich af te vragen na Tyndalls waarnemingen. Ze verzamelden telkens nieuwe puzzelstukjes. Door de analyse van luchtballen in oude ijskeren weten we hoeveel CO<sub>2</sub> er vroeger in de lucht zat. Weer andere analyses hebben uitgewezen hoe warm het vroeger in verschillende periodes was.<sup>39</sup>

Gaandeweg hebben wetenschappers de puzzel kunnen leggen en zijn we gaan begrijpen waarom het klimaat van nature verandert en ook welke rol broeikasgassen daarbij spelen.

### Hoe de mens een nieuwe ijstijd tegenhield

Tijdens ijstijden, de koude periodes waarin ijskappen een groot deel van de wereld bedekken, is de hoeveelheid zonnestraling op het noordelijk halfrond relatief laag en is er relatief veel CO<sub>2</sub> opgeslagen in de oceanen.

Warmere periodes beginnen als de zonnestraling op het noordelijk halfrond geleidelijk toeneemt door schommelingen in de aardbaan. De ijskappen beginnen dan te smelten en de oceanen warmen op.

Naarmate het zeewater warmer wordt, laat het meer CO<sub>2</sub> los, zoals prik uit een glas cola sneller verdwijnt als je het in de zon zet. Eenmaal in de dampkring versterkt de vrijgekomen CO<sub>2</sub> de opwarming die door de extra zonnestraling in gang is gezet.<sup>40</sup>

Dankzij dit natuurlijke proces brak 11.650 jaar geleden ons warme tijdperk aan. Er zweefden toen ongeveer 260 deeltjes CO<sub>2</sub> per miljoen deeltjes in de lucht (de eenheid hiervoor is 'ppm', 'parts per million' of 'deeltjes per miljoen'). Het was aangenaam warm, en het klimaat was stabiel genoeg voor de ontwikkeling van de landbouw.

In onze lange mars naar moderniteit hebben we vervolgens als soort iets unieks gepresteerd: we hebben de volgende ijstijd voorlopig te gengehouden.

Bizar! Hoe dan?

Als wij de CO<sub>2</sub>-concentratie niet hadden opgekrikt, zou de aarde nu op weg zijn naar een nieuwe ijstijd.<sup>41</sup> De planeet krijgt nu ongeveer net zo veel (lees: weinig) energie van de zon als tijdens het hoogtepunt van de laatste ijstijd.<sup>42</sup> En zonder menselijke invloed zou de CO<sub>2</sub>-concentratie de afgelopen duizenden jaren langzaam zijn gaan dalen.

Vergelijk het met hoe je lever alcohol in je bloed afbreekt. De aarde ontdoet zich van hoge CO<sub>2</sub>-concentraties door een aantal natuurlijke processen, waarvan de *verwerking van steen* het belangrijkste is.

Dit verweringsproces is extreem traag en machtig: CO<sub>2</sub> opgelost in regenwater reageert met gesteente, spoelt in opgeloste vorm via rivieren uit naar zee, en wordt daar door organismen benut om kalkskeletjes te bouwen. Uiteindelijk, als die diertjes sterven, belandt het C-molecuul uit CO<sub>2</sub> – de koolstof – op de bodem van de oceaan. Over een periode van tienduizenden jaren verkrumelen zo zelfs de grootste bergen, en tijdens die 'erosie' verdwijnt er CO<sub>2</sub> uit de lucht.<sup>43</sup>

Kortom: als je lang genoeg wacht, maakt de natuur hoge concentraties CO<sub>2</sub> in de lucht onschadelijk, omdat er jaar in jaar uit iets meer CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer verdwijnt. Het gevolg is afkoeling, groeiende ijskappen, en uiteindelijk – nog weer duizenden jaren later – een nieuwe ijstijd.<sup>44</sup>

Maar op dit moment zijn we juist níét op weg naar een nieuwe ijstijd. Meetstations over de hele wereld laten zien dat het inmiddels ruim een graad warmer is dan vóór het begin van de industriële revolutie. Hoe kan dat, hoe hebben we dat gepresteerd?

## De landbouwrevolutie: opwarming 1.0

De huidige opwarming begon met ontbossing. In iedere boom, en in de bodem van een gezond bos, zit koolstof opgeslagen. Maar als we een bos omhakken of afbranden, dan komt een groot deel van die koolstof vrij – in de vorm van het gas CO<sub>2</sub>.

Het omgekeerde gebeurt als een plant of bos groeit: dan wordt CO<sub>2</sub> uit de lucht vastgelegd en door de plant of boom als bouwstof gebruikt. Voilà: een kringloop van leven. Maar als er structureel meer bos verdwijnt dan er aangroeit, stijgt de concentratie van CO<sub>2</sub> in de atmosfeer en wordt het warmer.

De Amerikaanse klimatoloog William F. Ruddiman is in 2003 de eerste die met deze hypothese komt: dat onze soort het klimaat al ging beïnvloeden toen we op grote schaal bomen begonnen te kappen om akkers aan te leggen.<sup>45</sup>

Zijn stelling strookt met de reconstructies: zo'n 7.000 jaar geleden begon de CO<sub>2</sub>-concentratie in de lucht inderdaad te stijgen, van 260 ppm aan het begin van ons warme tijdvak tot 280 ppm vlak vóór het begin van de industriële revolutie.

De concentratie van methaan (CH<sub>4</sub>), een ander broeikasgas, ging 5.000 jaar geleden ook omhoog. Volgens Ruddiman komt dat door de rijstplantages die mensen rond die periode begonnen aan te leggen. Ze zetten stukken grond onder water, waardoor planten gingen rotten. Rottende planten en rijstplanten stoten methaan uit.<sup>46</sup>

Dat is een venijnig gas: het houdt zeker tachtig keer zo veel warmte vast als CO<sub>2</sub>,<sup>47</sup> en is verantwoordelijk voor minstens 17 procent van de huidige opwarming.<sup>48</sup> Het enige voordeel van dit gas is dat methaan gemiddeld 'maar' negen jaar in de lucht zweeft voor het uit elkaar valt. Maar de reactie waardoor methaan verdwijnt, levert helaas weer CO<sub>2</sub> op.

Toen Ruddiman in 2003 zijn hypothese publiceerde, was die nog controversieel. Maar de afgelopen jaren stortten vele wetenschappers zich op Ruddimans bewering en telkens blijkt het bewijs alleen maar sterker.<sup>49</sup>

Langzaam ontstaat er consensus over een van de meest fascinerende feiten uit onze geschiedenis: zonder het te weten zijn we ruim 7.000 jaar geleden al begonnen een nieuwe ijstijd uit te stellen.

De gestaag afnemende zonnestraling op het noordelijk halfrond werd de afgelopen duizenden jaren gecompenseerd door de extra opwarming als gevolg van de uitstoot van landbouwers. Het resultaat was een relatief stabiel klimaat: stabiel genoeg voor de ontwikkeling van moderne beschavingen, arena's, universiteiten en later kuststeden met miljoenen inwoners.

Natuurlijk: er waren altijd schommelingen. Droogtes konden hele beschavingen te gronde richten – zo kwamen Mesopotamië en de Mayacultuur aan hun einde. Maar die lokale schommelingen vonden altijd plaats binnen een vrij smalle bandbreedte. 10.000 jaar lang varieert de gemiddelde temperatuur op aarde nauwelijks – een maximale afwijking van 0,7 graad Celsius van het gemiddelde, dat was het summum.<sup>50</sup> Deze omstandigheden bleken voor ons optimaal om ons te ontwikkelen van jager-verzamelaars tot de mensen die we nu zijn.

Als we het bij die relatief beperkte CO<sub>2</sub>-uitstoot van vóór de industriële revolutie hadden gelaten, waren de gevolgen waarschijnlijk gunstig. Noem het opwarming 1.0, de milde variant. Het resultaat was een aangenaam stabiel klimaat. Genoeg CO<sub>2</sub> en methaan in de lucht om een nieuwe ijstijd tegen te houden. Knap gedaan.

Maar we schoten door.

## Fossiele brandstoffen: opwarming 2.0

Met de komst van de industriële revolutie gingen we fossiele brandstoffen gebruiken, in gigantische hoeveelheden. Dit resulteerde in opwarming 2.0 – meer, sneller, gevaarlijker.

Waarom is het gebruik van olie, gas en kolen zo link voor het klimaat? Even terug naar het begin: fossiele brandstoffen ontstaan als boom- en plantenresten, plankton en ander organisch materiaal in de aardkorst worden samengeperst. Dit gebeurt onder extreem hoge

druk en gedurende extreem lange periodes – duizenden tot miljoenen jaren.<sup>51</sup>

De CO<sub>2</sub> die planten tijdens het groeien uit de lucht hebben opgenomen, verdwijnt zo als koolstof in de grond. Veilig opgeborgen. Naast de verwerking van steen – de verkruiemelende berggen die koolstof afvoeren – is dit de tweede manier waarop de natuur CO<sub>2</sub> onschadelijk maakt.

Maar deze veilige opslag wordt tenietgedaan als mensen deze brandstoffen opgraven en verbranden – want tijdens de verbranding wordt die koolstof weer omgezet in CO<sub>2</sub>. Tussen 1750 en 2018, in krap 270 jaar, steeg de CO<sub>2</sub>-concentratie door ons toedoen met ruim 50 procent – van 280 tot 410 ppm. Dat is een krankzinnig snelle groei.

Als je het tempo waarin wij broeikasgassen uitstoten vergelijkt met eerdere klimaatveranderingen in de geschiedenis van de aarde, zie je goed hoe uitzonderlijk onze invloed is. Tijdens het laatste deel van de vorige ijstijd, bijvoorbeeld, steeg de CO<sub>2</sub>-concentratie gedurende een periode van ruim 7.000 jaar van 190 naar ruim 260 ppm aan het begin van ons warme tijdvak. Dat is een stijging van ongeveer 0,01 ppm per jaar. De verschuiving die wij hebben ingezet vanaf de industriële revolutie, is ongeveer 0,5 ppm per jaar. Wij gaan dus *vijftig keer zo snel*.<sup>52</sup>

Als langzaam stromende lava het tempo van de natuur is, dan zijn wij een skydiver in vrije val.<sup>53</sup>

CO<sub>2</sub> is het belangrijkste broeikasgas dat we uitstoten, het veroorzaakt bijna twee derde van de huidige opwarming.<sup>54</sup> Maar het is niet alleen CO<sub>2</sub>; ook de concentratie van methaan, lachgas en andere broeikasgassen is in de afgelopen 150 jaar flink gestegen. In de 66 miljoen jaar geologische geschiedenis waarover we enigszins betrouwbare reconstructies hebben, is geen precedent te vinden voor dit tempo van klimaatverandering.<sup>55</sup> Vergeleken met 1750 stevenen we nu af op een gemiddelde wereldwijde opwarming van 3 à 4 graden Celsius aan het einde van deze eeuw.<sup>56</sup>

Dat lijkt een kleine verandering – de lokale temperatuurschommelingen tussen dagen en nacht zijn een stuk groter. Maar zo'n variatie in de gemiddelde wereldtemperatuur heeft gigantische gevolgen.

Vergeet niet dat het verschil tussen een wereld van sneeuw en ijs – de vorige ijstijd – en het begin van ons comfortabel warme tijdvak 'slechts' 3 tot 8 graden was. De 3 à 4 graden extra opwarming die wij nu dreigen te veroorzaken, kunnen ons naar een toekomst voeren waarin grote delen van de aarde onleefbaar warm zijn, zoals grote delen van de aarde tijdens een ijstijd onleefbaar koud zijn.

Vergelijk het met je lichaamstemperatuur: constant 37 graden, met maximaal een halve graad variatie. Binnen die supersmalle marge werken onze lijven. Daarbuiten liggen onderkoeling, koorts, permanente breinschade en dood op de loer.

Een beetje verhoging of een tijdelijke rilling: dat hebben we in de recente geschiedenis al wel meegemaakt. Voortdurende hoge koorts? Dat is nieuw. En gevaarlijk.

Meestal merken we pas hoe nuttig een evenwicht is als het wegvalt.

### (On)zekerheid in de klimaatwetenschap

Hoe vast staat dit allemaal? Zoals elke wetenschap heeft de klimaatwetenschap haar onzekerheden. Hoe warm het de komende eeuwen precies wordt, weten we niet. Dat hangt voor een belangrijk deel af van de hoeveelheid broeikasgassen die we de komende decennia uitstoten. Specifieke gevolgen op specifieke plekken zijn moeilijk te voorspellen.

En er is veel dat wetenschappers nog niet weten. Hoe wolkvorming in een warmer klimaat de opwarming verergert of vermindert, bijvoorbeeld. Het recente onderzoek dat ik eerder noemde – de voorspelling dat een deel van de wolken zou kunnen verdwijnen – suggereert welke kant het eventueel op kan gaan, maar het laatste woord is hier nog niet over gezegd. En hoe innovatief mensen de komende eeuwen op de opwarming reageren, is natuurlijk ook nog onvoorspelbaar.

Maar over de basale principes van klimaatverandering is sinds eind negentiende eeuw, toen Tyndall aan zijn experimenten begon, veel zekerheid en consensus ontstaan.