

Mayday!

Mayday!

voor het Klimaat

**Mayday!
Mayday!
voor het Klimaat**

Carl Denef

Schrijver: Carl Deneff

Coverontwerp: Cover Designer van Brave New Books

ISBN: 9789464800739

© Carl Deneff - Januari 2023

In dit boek worden twee soorten figuren aangewend: figuren afkomstig uit de rapporten van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) en figuren uit andere bronnen. De figuren uit de IPCC-rapporten in dit boek hebben dezelfde nummering als de figuren aanwezig in de oorspronkelijke IPCC-rapporten. B.v. **Figuur 1.6** in deze tekst heeft hetzelfde nummer als de overeenkomstige figuur in het IPCC-rapport naar waar verwezen wordt. Figuren uit ander werk zijn genummerd met **X** gevolgd door een cijfer in volgorde van het gebruik, b.v. **Figuur X1** is de eerste figuur, **Figuur X10** is de 10^{de} figuur, enzovoort.

Inhoudstafel

Woord vooraf	11
Hoofdstuk 1: De wording van de klimaatverandering	19
Hoofdstuk 2: Het Klimaatakkoord van Parijs – December 2015	65
Hoofdstuk 3: Het Tussentijds Rapport van het IPCC – Oktober 2018	71
Hoofdstuk 4: Het 6 ^{de} Rapport van het IPCC – Augustus 2021	
4.1 Evaluatie van de (on)zekerheid in de beoordeling van de klimaatverandering	83
4.2 De vorderingen in het AR6 rapport t.o.v. de AR5 en AR4 rapporten	85
4.3 Nieuwe klimaatmodellen en scenario's voor de inschatting van het klimaat in de toekomst	87
4.4 Onderlinge vergelijking tussen de nieuwe SSP's en de vroegere RCP's	93
4.5 Oppervlaktetemperatuur over land en oceanen	94
4.6 Oppervlaktetemperatuur van de oceanen	99
4.7 Opwarming van de troposfeer maar afkoeling van de stratosfeer	100
4.8 Invloed van seizoenen op global warming	102
4.9 Warmteopslag in de oceanen	103
4.10 De watercyclus en neerslag	104
4.11 Langdurige droogtes	106
4.12 Grondwater	108
4.13 Zeeijs, landijs, sneeuw, zeespiegelhoogte en oceanverzuring	110
4.14 Menselijke 'vingerafdrukken'	119
4.15 Invloed van Rossby-golven, straalstroom, tropische en extra-tropische stormen en Hadley cell-circulatie	124
4.16 Vervroeging van groei- en oogstseizoen van planten	130
4.17 Klimaatgevoeligheid	132
4.18 Extreme klimaatimpacten	132
4.19 Regionale klimaatverandering	140
4.20 Emissies en atmosferische concentratie van broeikasgassen blijven tot vandaag toenemen	152
4.21 De stralingsforcering van broeikasgassen in de atmosfeer is de belangrijkste oorzaak van antropogene global warming	168
4.22 Respons van het klimaatsysteem op toevoeging en verwijdering van CO ₂	184
4.23 Paleoklimaat en <i>proxies</i>	189
Hoofdstuk 5: Klimaatverandering door verandering in landgebruik	197
Hoofdstuk 6: De 'United in Science 2021 en 2022'-rapporten	205
Hoofdstuk 7: De kosten van de zero-emissie transitie	211
Hoofdstuk 8: De VN-klimaatconferenties COP26 en COP27	219
Hoofdstuk 9: Klimaatmaatregelen: veel positieve resultaten, maar onvoldoende gekend	235
9.1 De klimaatmaatregelen van de EU	235
9.2 VN Clean Development Mechanism (2001-2018)	246
9.3 Climate Action Tracker	247
9.4 Public Broadcasting Service inclusief Climate Action Tracker	250
9.5 Massachusetts Institute of Technology	252
9.6 Zero-emissie doeleinden	254
Hoofdstuk 10: Klimaatmaatregelen door burgerlijke ongehoorzaamheid en via de rechtbank	271

Afkortingen

AFOLU: Agriculture, forestry and other land use

AOD: Aërosol optical depth

AOGCM: Atmosphere–ocean general circulation model

AR4: IPCC Fourth Assessment Report

AR5: IPCC Fifth Assessment Report

AR6: IPCC Sixth Assessment Report

BC: Black carbon

BECCS: Bioenergy with carbon capture and storage

CCS: Carbon dioxide capture and storage

CDR: Carbon dioxide removal

CDRMIP: Carbon Dioxide Removal Model Intercomparison Project

CE: Common Era

CFCs: Chlorofluorocarbons

CMIP: Coupled Model Intercomparison Project

CMIP3: Coupled Model Intercomparison Project Phase 3

CMIP5: Coupled Model Intercomparison Project Phase 5

CMIP6: Coupled Model Intercomparison Project Phase 6

COVID-19: Coronavirus disease of 2019

DI: Drought Index

DIC: Dissolved inorganic carbon

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

ECS: Equilibrium climate sensitivity

EEOC: Early Eocene Climatic Optimum

EMIC: Earth models of intermediate complexity

ENSO: El Niño–Southern Oscillation

ERA-Interim: ECMWF global reanalysis

ERF: Effective radiative forcing

ESM: Earth system model

FAR: IPCC First Assessment Report

FOLU: Forestry and other land use

GCM: General circulation model, global climate model

GDP: Gross domestic product

GISS: NASA Goddard Institute for Space Studies

GISTEMP: NASA Goddard Institute for Space Studies Surface Temperature Analysis

GMSL: Global mean sea level

GMST: Global mean surface temperature

GRACE: Gravity Recovery and Climate Experiment

GSAT: Global surface air temperature
GWP: Global warming potential

HadCRUT: Hadley Centre Climatic Research Unit gridded surface temperature dataset
HadEX3: Hadley Centre gridded Land Surface extremes indices
HadSST: Hadley Centre Sea Surface Temperature dataset
HCFC: Hydrochlorofluorocarbon
HFC: Hydrofluorocarbon

IMF: International Monetary Fund
IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
IRF: Instantaneous radiative forcing
ITCZ: Inter-tropical Convergence Zone

JMA: Japan Meteorological Agency

LGM: Last Glacial Maximum
LIG: Last Interglacial
LSAT: Land surface air temperature
LUC: Land-use change
LULUCF: Land use, land-use change and forestry

MAGICC: Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change
MCO: Miocene Climatic Optimum
MIP: Model Intercomparison Project
MLO: Mauna Loa Observatory
MPWP: Mid-Pliocene Warm Period

NCAR: National Center for Atmospheric Research
NDC: Nationally Determined Contribution
NMVOC: Non-methane volatile organic compound
NOAA: USA National Oceanic and Atmospheric Administration
NOx: Nitrogen oxides

OC: Organic carbon
ODS: Ozone depleting substances
OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development
OH: Hydroxyl radical
OHC: Ocean heat content

PETM: Paleocene–Eocene Thermal Maximum
PgC: Petagrams of carbon
PM10: Particulate matter with diameter of less than 10 microns
PM2.5: Particulate matter with diameter of less than 2.5 microns

RCM: Regional climate model
RCMIP: Reduced Complexity Model Intercomparison Project

RCP: Representative Concentration Pathway
RF: Radiative forcing
RSLR: Relative sea level rise

SAR: IPCC Second Assessment Report
SCE: Snow cover extent
SF6: Sulphur hexafluoride
SLCF: Short-lived climate forcer
SO₂: Sulphur dioxide
SPCZ: South Pacific Convergence Zone
SPM: Summary for Policymakers
SPO: South Pacific Ocean
SR1.5: IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C
SSP: Shared Socio-economic Pathways
SST: Sea surface temperature

TAR: IPCC Third Assessment Report
TC: Tropical cyclone
TCR: Transient climate response
Tg: Teragram
TOA: Net top-of-the-atmosphere
TS: Technical Summary

UHI: Urban heat island
UK: United Kingdom
UN/VN: United Nations/Verenigde Naties
UNEP: United Nations Environment Programme
UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change

UV: Ultraviolet

VOC: Volatile organic compounds
VS: Verenigde Staten van America

WBGT: Wet bulb globe temperature
WCRP: World Climate Research Programme
WG I: IPCC Working Group I
WMGHG: Well-mixed greenhouse gas
WMO: World Meteorological Organization

ZJ: Zettajoule, 10²¹ joules

Woord vooraf

Het verhaal van dit boek gaat over de klimaatverandering die het aanschijn van de Planeet Aarde fundamenteel heeft veranderd en een nieuw tijdperk deed ontstaan, het *Antropoceen*. Mensen, en alleen mensen, zijn er de oorzaak van. Mensen veroorzaakten diepe veranderingen in de structuur en het functioneren van het systeem Aarde en legden sporen van hun aanwezigheid vast in het geologisch record. De klimaatverandering heeft een onheilspellende toestand van permanent gevaar en bedreiging doen ontstaan. Nu reeds komen extreme weersomstandigheden geregeld de rust verstoren en veroorzaken ze voor miljarden dollars schade. Water en vuur komen samen. Overstromingen en natuurbranden kosten mensenlevens, hittegolven veroorzaken vroegtijdige dood, natuurlijke habitats en ecosystemen verdwijnen, onafbreekbare stoffen zitten overal en bedreigen voor altijd de gezondheid, en fijn stof dringt door tot in de hersenen. Nergens is er een oord waar een negatieve menselijke stempel niet aanwezig is. De impacten treffen vooral zij die het minst hebben bijgedragen aan de klimaatverandering. Vluchtelingenstromen dreigen op gang te komen vanuit arme tropische gebieden naar meer noordwaarts gelegen rijke landen.

Om energie te genereren gebruikten mensen vanaf het einde van de 18^{de} eeuw fossiele bronnen (steenkool, olie en aardgas) voor energieproductie. Ze verbrandden deze bronnen, waardoor broeikasgassen in de atmosfeer en oceanen terecht kwamen. CO₂, methaan, lachgas (N₂O), hydrofluorocarbons (HFC's), Ozon en Black Carbon, leidden tot opwarming van de aarde aan een nooit eerder geziene snelheid. De gemiddelde oppervlaktetemperatuur van de aarde steeg gestaag en toxische producten bezoedelden het milieu, wat allerlei negatieve impacten had op het aardse leven. De klimaatverandering activeert de stromingen in de atmosfeer en de oceanen waardoor hittegolven, stormen, overstromingen, bosbranden, zeespiegelstijging, oceaanzurging, ecologische neergang en schade aan de menselijke en dierlijke gezondheid en dooi in de permafrost ontstaan. Bovendien heeft de mens in toenemende mate bossen gekapt om plaats te ruimen voor landbouw, wonen en verkoop van hout. Om de enorme bevolkingsexplosie op te vangen, nam de landbouwintensiteit enorm toe. Er kwam een jacht naar grondstoffen, productie van voedsel voor de enen en malnutritie voor anderen, en zware verstoring van de biologische diversiteit

en habitat. De steeds toenemende productie leidt tot schaarste aan hulpbronnen. Mensen nemen heden meer natuurlijke hulpbronnen weg dan de aarde kan regenereren.

De wetenschap weet al sinds decennia dat de gemiddelde oppervlaktetemperatuur van de aardse atmosfeer gestadig stijgt en heeft daar een uitleg voor gevonden: CO₂ en andere broeikasgassen. Wetenschappers proberen de verantwoordelijken in de maatschappij attent te maken dat verdere temperatuurstijging catastrofaal kan worden en dat het terugdringen van de opwarming de enige weg is om de nefaste gevolgen van de klimaatverandering te bestrijden. Helaas zijn er tot op de dag van vandaag nog steeds lobby-groepen bezig de beslissingen van regeringen te manipuleren voor eigen gewin, zonder scrupules voor het lot van de planeet en de rechten van toekomstige generaties. Het is ondertussen ook duidelijk geworden dat de opwarming naar menselijke tijdsnormen irreversibel is. De opwarming zal eeuwen tot millenia blijven bestaan omdat de response van het klimaatsysteem op de CO₂-stijging relatief traag verloopt en CO₂ zeer traag verdwijnt uit de atmosfeer naar bodem en oceaan – de oceaan vertoont een trage uitwisseling omdat de grootte en diepte zo enorm is. De gemiddelde interjaarlijkse schommeling van de temperatuur is sinds het begin van het holoceen-tijdperk niet groter geweest dan 1°C [van +0.5 °C tot –0.5°C]. De grens van veilige temperatuurstijging (~1.5 °C) is vandaag op veel plaatsen al overschreden. Deze kleine stijging heeft catastrofale gevolgen op het weer. Het is dus hoog tijd om verdere stijging een halt toe te roepen en de broeikasgasemissies terug te brengen tot het niveau dat bomen, de bodem en de oceanen op natuurlijke wijze kunnen opnemen. Tegen 2030 moeten de broeikasgasemissies met 55 % dalen ten opzichte van de referentieperiode 1850-1900. We zijn halfweg de periode 2015-2030, maar zowel de broeikasgasemissies als hun concentraties in de atmosfeer blijven maar stijgen. We zijn na het Akkoord van Parijs al 7 jaar bezig met vooral *beloftes* op papier te zetten en te beweren dat we al veel doen. Vandaag zijn we begin 2023 en onmiddellijke en drastische maatregelen zijn er (nog steeds) niet. Er resten nog 7 jaar om dit te verwezenlijken. Halen we de due date van 2030 niet, zullen de klimaatimpacten toenemen en dreigen er onomkeerbare feedbacks voor te komen, de z.g. *tipping points* (1)(2).

De conservatieve levenswijze lijkt mensen vast te houden in het *status quo*. Het belet hen de gepaste maatregelen te nemen tegen de toenemende klimaatim-

pacten. Decennialang ontkenden rijke landen dat er iets mis was met het klimaat. Het paste niet in hun business modellen, wat onverschilligheid en onwil creëerde. Het getalm van de beleidsverantwoordelijken heeft geleid tot een ware klimaatcrisis, die hoe langer hoe heviger om zich heen slaat, niet alleen in de tropen maar ook bij ons in het Noorden. Nochtans werd er een grote stap voorwaarts gezet in december 2015 toen op de COP 21 klimaatconferentie (Conference of Parties) het *Akkoord van Parijs* werd goedgekeurd. Toen leek er voor de eerste keer een consensus te zijn gegroeid dat er iets moest gedaan worden aan de dreigingen van het klimaat. Iedereen was enthousiast en er werden beloftes gedaan. Helaas bleef het daarbij. Goede voornemens worden zelden snel waargemaakt, zeker als de toekomst nog veraf lijkt. Hoe kan het ook anders? De mens heeft nooit geleefd onder de bedreiging van gevaar in een verre toekomst. Men herhaalt al te vaak hoe het probleem moet opgelost worden, maar men gaat niet over tot overtuigende daden. Als de ander niets doet, doe ik ook niets, denkt men. De *'sense of urgency'* ontbreekt. De klimaatcrisis moet nochtans nú worden aangepakt, maar men kijkt nog dikwijls de andere richting uit als het tot actie moet komen. Angst om niet herkozen te worden paralyseert de overheid in Westerse landen. Deze contraproductieve houding dreigt de goede voornemens van het Akkoord van Parijs terug naar de koelkast te verplaatsen. De oude demonen duiken weer op en de mens wordt weerom blind voor wat hem boven het hoofd hangt. Hij is *blind voor de reactionaire krachten* in hem. *'Het is niet dringend, we kunnen wachten tot morgen'* wordt er gedacht, of men vind een excuus om niet tot handelen te moeten over gaan. Nog andere beleidsmakers denken dat er al veel – genoeg zelfs – wordt gedaan om het klimaat te redden, waardoor ze nog meer hinderpalen opbouwen om tijdig voorzorgen te nemen om het klimaat te beschermen.

In wezen is de klimaatcrisis het resultaat van een historisch falen van het denken over de ware betekenis van het mens zijn. Mensen lijken niet te beseffen dat leven in harmonie met de natuur de uiteindelijke zin aan het leven geeft door een innige band met de natuur op te bouwen. Door geloof te hechten aan de Bijbel heeft de mens zijn gedrag afgestemd op het woord van God en de biologische evolutie naar zijn hand gezet. God schiep de wereld, en nadien de mens, naar zijn beeld en gelijkenis, zo verhaalt de Bijbel. Er staat ook geschreven dat God de mens een opdracht gaf : de mens moest de aarde bevolken en over de natuur heersen. God sprak tot hem: *'Wees vruchtbaar en word talrijk; bevolk de*

aarde en onderwerp haar; heers over de vissen van de zee, over de vogels van de lucht, en over al het gedierte dat over de grond kruipt' (Genesis 1: 28). Zo'n scheppingsverhaal is aberrant en misleidend. De natuur, niet God, toont hoe te leven. We leven in nauwe relatie tot de ecosystemen. We hebben de ecosystemen nodig. We zijn er afhankelijk van. Sterven die, dan sterven ook wij. Men kan het scheppingsverhaal ook helemaal anders lezen. Het is niet God die de Bijbel inspireerde, het is niet God die de mens schiep, het is de mens die God schiep om aan Hem macht te ontnemen. Macht zoeken is een instinct dat zin kreeg in de evolutiestap naar de mens en nu nog steeds in ons DNA zit. De mens heeft het streven naar macht niet alleen gelegitimeerd maar ook gecultiveerd via de Bijbel. Het is uitgemond in gruweldaden. De mens wilde als het ware God zelf zijn, soms half, soms helemaal. Het gaf de mens een gevoel van grenzeloosheid, arrogantie en onderwerping van de mens door de mens. Het kwam tot broedermoord, oorlog, onverdraagzaamheid, discriminatie, slavernij, terrorisme, onderwerping van soortgenoten en een zucht naar andermans bezit. Er ontstond ongelijkheid – de *'haves'* en de *'have-nots'*. Leugens en misleiding namen de bovenhand. Weapons of mass destruction werden putative *'weapons of self destruction'*. Er kwam pollutie en degradatie van het milieu, het uitputten van de natuurlijke hulpbronnen door overconsumptie van aardse goederen, demografische explosie, beschavingsziekten t.g.v. zowel overvloed als armoede, en stijgend geweld in naam van steenkool, olie, gas en religie. Steeds opnieuw vervalt de mens in oorlog en destructie, en hervalt hij steeds in een nieuwe oorlog. De mens zoekt en vindt telkens een existentieel probleem in zichzelf, en roept het Bijbelverhaal in om zijn gedrag te legitimeren.

Het antropoceen, het tijdperk waarin we nu leven, is een product van de menselijke genen. Menselijke genen zorgden voor het genereren van wetenschap, technologie en kennis. Mensen maakten de wetten die de basis vormen van rechtvaardigheid en beschaving. Maar de mens schiep ook een economisch systeem dat zijn impact grenzeloos kon uitbreiden, maar in conflict was met zijn eigen inbedding in de natuur. Dat economisch systeem is het kapitalistisch *'waardensysteem'* dat zich aan alle ideologieën aanpast – of juist geen ideologie heeft – en daardoor de mens in zijn voortbestaan bedreigt. Het kapitalistische systeem is verwerpelijk omdat het steeds leidt tot oorlog. In het kapitalistische systeem is de belangrijkste drijfveer niet de zorg voor mensen en hun natuurlijke omgevingen, maar geldwinst, vraatzucht en privé-eigendom. *'Keep out! No*

trespassing! This is private property! Zijn eigen bezit is de uiteindelijke driver van het conflict. De kapitalistische productiewijze en winstaccumulatie creëert een existentieel probleem in de samenleving en leidt sowieso tot ernstige sociale en ecologische schade. Marx en Engels ontwikkelden de theorie dat het moderne kapitalistisch systeem de arbeidersklasse uitbuitte. Arbeiders maken de producten, maar de kapitaalbezitter nam die producten in eigen bezit omdat hij, zo redeneerde hij, de productiemiddelen bezat en de producten of diensten op de markt verkoopt met een winst die hij haalt uit de meerarbeid van de arbeiders, d.w.z. arbeid verricht boven de arbeid die nodig is om te voorzien in het levensonderhoud van de arbeider. Omdat arbeid traditioneel als iets van het zelf wordt beschouwd, vervreemde de kapitaalbezitter de arbeiders van de producten van hun arbeid en van zichzelf. Het verplaatsen van arbeid naar fabrieken brak de traditie van arbeid in de vertrouwde omgeving van huis en gemeenschap. De toenemende versnippering van de tijd door een steeds toenemende generatie van kansen, en de toenemende fractionering van beroepen en diensten onder de arbeiders, vertroebelden de waardeperceptie van de eigen bijdrage. Het systeem kan maar overleven als producten snel worden vervangen met nieuwe producten en worden geconsumeerd. Het nieuwe maakt het oude voortdurend overbodig, zo las men ooit de dichter Charles Baudelaire (1-a). Deze veranderingen ondermijnden de natuurlijke behoefte van zelfrealisatie, onafhankelijkheid en sociale inbedding en gaven veel mensen een gevoel van meegesleept te worden in een wervelstroom van kunstmatige uiterlijkheden, in scène gezet door het kapitalisme. Het valse dogma dat alleen economische groei het kapitalistische systeem kan bestendigen, maakt zowel de kapitaalbezitter als de consument tot slaaf van het onderliggende systeem. De steeds toenemende concurrentie en winstmaximalisatie schaadt de geestelijke gezondheid van beiden. Het kapitalisme resulteert in extremen: ondanks de enorme kapitalistische productiviteit hebben meer dan 800 miljoen mensen niet genoeg te eten, maar dankzij het kapitalisme lijden 500 miljoen volwassenen nu aan overgewicht en obesitas.

De kapitalistische mythe van grenzeloosheid voedde een houding van superioriteit ten opzichte van andere culturen, wat leidde tot exploitatie van land dat aan anderen toebehoort, kolonialisme, etnische discriminatie, racisme, intolerantie voor anders-geraardheid, genderdiscriminatie en politieke manipulatie voor macht over olie en grondstoffen, die de kiem werden van extreem geweld

dat we vandaag de dag ervaren bij het islamitisch extremisme, de sociale malcontenten en ontwikkelaars van complottheorieën. De ergste kwaal van het kapitalisme heeft zich de afgelopen 35 jaar ontwikkeld op het pad van het neoliberalisme, een economisch systeem dat sterk de nadruk legt op de marktwerking (prijsbepaling door vraag en aanbod) en het maximaliseren van de individuele vrijheid. Oorspronkelijk was er het blinde geloof dat de markt zonder overheidsinterventie vanzelf in evenwicht zou komen en werk zou verschaffen aan iedereen, maar dat bleek helemaal niet het geval te zijn. Het leidde tot toenemende sociaaleconomische ongelijkheid, sociale discriminatie, imperialisme, oligarchie en plutocratie, en tastte de democratische verworvenheden aan.

Beleidsmakers heulen dikwijls mee met het kapitalistische machtssysteem en laten daardoor hun aandacht voor het klimaatprobleem afdwalen. Een steeds groter deel van het geld gaat naar financiële systemen die niet de reële economie dienen, maar zich richten op het genereren van meer geld voor de superrijken. De voortdurende stijging van de productiviteit vandaag de dag gaat niet langer gepaard met een stijging van de lonen. Salarissen van het senior management en bonussen worden onevenredig aan de verdienste van die managers gelinkt, terwijl spaargeld van de gewone man een afnemend tot geen rendement oplevert. Of die superrijken het werkelijk verdienen hebben is maar de vraag. Zo is vandaag de rijkste man ter wereld de Fransman Bernard Arnault, bedrijfsleider in luxe-artikelen. Hij en zijn familie hebben een netto-waarde van \$188 miljard. Daar tegenover staat dat in steden mensen vervreemd raken van de plek waar ze woonden, omdat huisvesting er onbetaalbaar wordt voor de gewone man.

Het klimaatprobleem is de hedendaagse uitwas van het kapitalisme. Het grote gevaar van dit steeds maar sneller evoluerend van productieproces is de toenemende sociaaleconomische ongelijkheid en onrechtvaardigheid. Ze leiden tot sociale instabiliteit en uiteindelijk tot maatschappelijke ineenstorting als gevolg van de zelfbediening van de heersende elite en de verarming van de gewone man. In combinatie met klimaatverandering, ontstaan weldra ook klimaatvluchtelingen, wat de sociale ineenstorting zal versnellen. Vooral mensen die onverschillig zijn tegenover de negatieve effecten van het kapitalisme verergeren de feitelijke toestand, ook die van het klimaat. En dit alles omdat de mens de natuur heeft willen onderwerpen aan zijn verlangens, zijn honger en vraatzucht, zonder respect voor die natuur op te brengen. Wetenschappers hebben hier

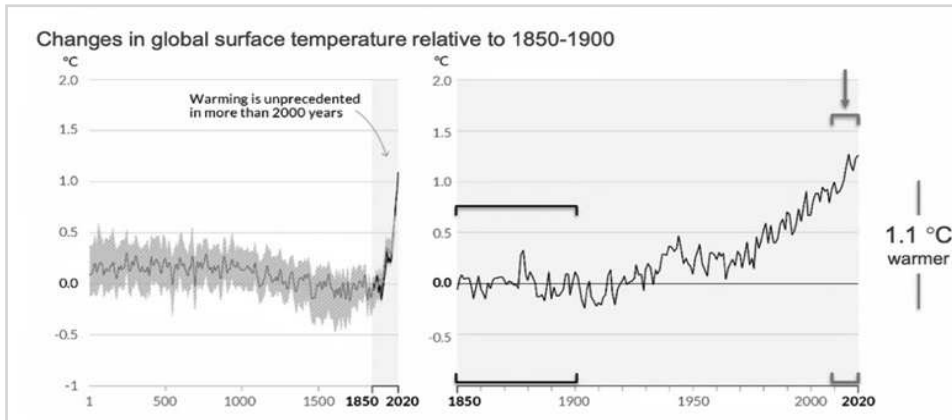
reeds voor gewaarschuwd aan het einde van de 19de eeuw. Maar naar klimaatwetenschappers werd weinig of niet geluisterd.

In vele landen presteren de beleidmakers ondermaats in hun klimaatacties. Om iedereen mee te krijgen in de klimaatactie moeten de 'dragers van de uitvoerende macht' *laten zien* dat ze *effectief* resultaat *kunnen* bereiken en niet alles overlaten aan de privé-sector en andere sectoren. Het is essentieel om een massabeweging tot stand te brengen. Massabewegingen ontstaan echter niet als er geen voorbeelden zijn. Ik wil niet beweren dat er helemaal niets gebeurt, ik wil alleen zeggen dat er ***niet genoeg wordt gedaan*** en ***niet genoeg gezegd wordt wat er gebeurt***. Onze toekomst ligt nog steeds in onze handen. We kunnen nog steeds tijdig het klimaat herstellen. Zo is de Rechtstaat de laatste jaren meer en meer actief geworden om bedrijven en landen aan te klagen voor hun gebrek aan inzet in hun klimaatverplichtingen. Zo is er het 'burgemeester covenant' (3) – een conglomeraat van steden dat zich, onafhankelijk van het mondiale klimaatdoelen, inspant om klimaatneutraal te worden –, het streven naar wereldwijde ecologische duurzaamheid, het bedrijfsleven, ngo's, de academische wereld en monitoring instellingen die de transitie naar hernieuwbare energie analyseren en kenbaar maken. Verschillende landen zijn begonnen hun CO₂-voetafdruk te verkleinen. Ongeveer 41 landen, waaronder grote economieën zoals de Verenigde Staten (VS), Duitsland en het Verenigd Koninkrijk (VK), hebben hun uitstoot sinds 2010 verminderd, en in nog eens 30 landen is de uitstoot per hoofd van de bevolking gedaald. Het toont aan dat het mogelijk is om de uitstoot te verminderen zonder de economie eronder lijdt. Maar het moet beter en meer! Op de klimaatconferentie in Glasgow (COP26, november 2021) was het adagio steenkool uitfaseren tegen 2040, alhoewel vandaag meerdere landen daarop terugkomen (4)(5). Tenslotte zijn er de jongeren die de laatste jaren wereldwijd klimaatbetogingen organiseren en politici, fossiele brandstofondernemingen en banken radicaal en met luide stem laten horen dat deze tekort schieten in hun klimaatacties. Gelukkig zijn zij het die ons een spiegel voorhouden.

Hoofdstuk 1

De wording van de klimaatverandering

Toen ik 10 jaar geleden de klimaatverandering begon te bestuderen, was er nog veel ongelof over de ernst van het probleem. Er waren nog steeds mensen, weliswaar vooral in de Verenigde Staten (VS), die categoriek de klimaatverandering ontkenden en beweerden dat er geen bewijs was dat broeikasgassen geproduceerd door mensen de oorzaak waren van de opwarming. Democraten in de VS zijn vandaag meer dan drie keer zo talrijk als Republikeinen, die de mening zijn toegedaan dat het aanpakken van klimaatverandering een topprioriteit moet zijn (78% vs. 21%) (5a). Vooral de industriële wereld en olieproducenten zijn dikwijls ontkeners en spannen zich in om te lobbyen tegen de klimaatwetenschap (6)(7)(8). Zelfs in mijn omgeving vroeg men al eens of ik een *believer of een non-believer* van de klimaatverandering was. Mijn antwoord: *‘Het is geen kwestie van believing or not, maar van vaststaande feiten, die berusten op de wetten van de Fysica.* Anderen, nog steeds in mijn omgeving, stelden me de vraag: *“is het al niet te laat om nog iets te doen om de klimaatverandering tegen te werken?”*. Dat waren de defaitisten dan. Nog anderen zeiden: *“zelf iets doen tegen de klimaatverandering haalt niets uit, het is een druppel op een hete plaat”*. Vandaag is de gewone sterveling eindelijk overtuigd geraakt: onze Planeet warmt op (‘global warming’) en wij zijn er met zijn allen verantwoordelijk voor. Een belangrijke fractie onder hen, doet echter weinig voor het klimaat en spreekt er amper over. Velen aanzien het klimaatprobleem niet als iets dat dringend is. Anderen, een minderheid, beseffen dat we een gemeenschappelijke schuld moeten vereffenen: we hebben stijgende hoeveelheden fossiele brandstoffen ontgonnen, en ze verbrand voor energiewinning voor verwarming, elektriciteitsopwekking, industrie, privé-consumptie, openbaar vervoer en luxe. Het gevolg was opwarming. Fossiele brandstoffen – die we zelf niet geproduceerd hebben – hebben we bovendien kwistig verbruikt. Toch is



Figuur 1: Evolutie van de gemiddelde mondiale oppervlaktetemperatuur gedurende de laatste 2000 jaar en tussen 1900 en 2020. Data uit IPCC AR6 WG I

het probleem van fossiele brandstofgebruik reeds meer dan 100 jaar gekend, de fysisch Svante Arrhenius vermoedde al in 1896 dat de aarde zou opwarmen o.i.v. stijgende broeikasgasconcentratie in de atmosfeer. Nu is de opwarming heel zichtbaar geworden, maar het heeft wel meer dan een eeuw geduurd voor een meerderheid van mensen tot een min of meer algemene aanvaarding is gekomen.

De gemiddelde jaarlijkse wereldwijde oppervlaktetemperatuur over land en zee is met **1.1 °C gestegen**, ten opzichte van 1850-1900, de referentieperiode aan het begin van de industriële revolutie (zie **Figuur 1**). De temperatuur stijgt niet alleen, ze **blijft stijgen** en **hoe langer hoe sneller**. Tussen 2012 en 2021 was de wereldwijde gemiddelde oppervlaktetemperatuur 1,11 tot 1,14 °C hoger dan het pre-industriële niveau; het was het warmste decennium ooit (9). Eén °C stijging lijkt niet veel, maar het klimaat op onze Planeet is erg gevoelig aan de verandering van de gemiddelde temperatuur. Die is van jaar tot jaar trouwens erg stabiel.

De opwarming gaat overal ter wereld meer en meer gepaard met perioden van **extreem weer**: hittegolven, langdurige droogte, verwoestende stormen, massale regenval en overstromingen, massale dooi van het landijs, zeespiegelstijging en bosbranden. Deze impacten zijn erg belastend voor mensen en veroorzaken hoe langer hoe meer materiële schade. De hedendaagse extremen werden sinds

millenia nooit gezien. Zowel het leven op het vaste land als in de oceanen wordt bedreigd. Het klimaat verkeert in een ware crisis.

Niemand leeft natuurlijk onder de 'gemiddelde oppervlaktetemperatuur boven land en zee'; mensen leven op het land, niet op zee – met uitzondering van kleine eilanden. Het is daarom realistischer te spreken over de gemiddelde temperatuur boven land. De **Europese landtemperaturen zijn in de periode 2012-2021 gestegen met 1,94 tot 1,99 °C**, afhankelijk van de gebruikte dataset (9).

1.1 De zomer van 2022

Lat ons hier even focussen op de zomer van 2022. Die zomer was bloedheet en droog (10). In juni werden de hoogste temperaturen ooit gemeten en dit over meerdere landen van de wereld. Recordbrekende hittegolven overspoelden het noordelijk halfrond, vooral in continentaal Europa, het VK, Pakistan, China en delen van de VS. 2022 ligt op schema om het vijfde warmste jaar ooit te worden in de meeste datasets; het kan ook het tweede warmste jaar worden, afhankelijk van hoe de temperaturen evolueren in de resterende maanden van het jaar. Deze hittegolven zijn des te markanter omdat ze zich voordeden tijdens een aanhoudende "dubbele dip" van La Niña, een koude temperatuurvariatie, die afwisselt met warmere periodes van El Niño in de tropen. In juni 2022 was de gemiddelde temperatuur boven land ongeveer 1,8 °C warmer dan in de pre-industriële (1850-1899) periode. Het VK brak zijn eerdere record van hoogste temperaturen ooit met 1,6 °C en bereikte 40,3 °C. In het grootste deel van Europa werden temperaturen bereikt tussen 40 en 43 °C, waarbij Hamburg in het Noorden van Duitsland voor het eerst 40 °C passeerde. In het VK zorgde de hitte in juli voor nieuwe recordhoogten in dagelijkse maxima en minima. In totaal zagen zes locaties in het VK temperaturen van 40 °C of meer, en 46 locaties overtroffen voorlopig het vorige record van 38,7 °C. China werd ook geconfronteerd met extreme hitte in juli, met temperaturen van meer dan 40 °C in Shanghai, wat leidde tot "rood alarm". Sinds 1873 zijn er slechts 17 rode waarschuwingen gegeven geweest, waarvan drie deze zomer. China kende ook een recordvraag naar elektriciteit vanwege de grote inzet van airconditioners. Ook de VS kende extreme hitte; ongeveer 60 miljoen Amerikanen in ten minste 16 staten hadden op 21 juli temperaturen van meer dan 38 °C en meer dan 100 mil-

joen mensen stonden onder hitte-waarschuwingen. Recordhittegolven, zowel in ernst als in hardnekkigheid, kwamen ook voor in India en Pakistan. Abnormaal hoge temperaturen hielden aan van maart tot en met mei en braken in beide landen vele dagelijkse records. Uit een analyse door onderzoekers van de *World Weather Attribution-groep* bleek dat de hittegolven toe te schrijven waren aan klimaatverandering (meer dan 30 keer waarschijnlijker dan natuurlijke variaties)([10](#)). In de VS is er al jaren droogtestress in het Zuid-Westen. Als gevolg hiervan naderden enkele van de belangrijkste drinkwaterbronnen van de regio hun breekpunt. Het waterniveau van Lake Mead, dat 25 miljoen mensen in het zuidwesten van de VS van water voorziet, daalde tot het laagste niveau in bijna 100 jaar, zo'n 9 m onder het jarenlange niveau van deze tijd van het jaar. Lake Powell, een stuwmeer langs de Colorado-rivier, lag nog steeds meer dan 6 m onder het niveau van 2021 en 21 m onder dat van twee jaar geleden ([11](#)). De zomer was pas begonnen, maar in de VS waren er dit jaar al meer dan 3 miljoen hectare land afgebrand. In New Mexico woedden er in april van dit jaar enorme branden, en die waren meer dan twee maanden later slechts gedeeltelijk onder controle. Branden in Arizona hebben gebieden verwoest die rijk zijn aan inheemse vindplaatsen en hebben gebouwen afgebrand ([11](#)). Er deden zich ook enorme stortbuien voor. Op 13 juni 2022 was er een nooit geziene stortbui in Yellowstone National Park; het Park werd gesloten en 10.000 mensen kregen opdracht te vertrekken; de overstromingen spoelden wegen weg en veroorzaakten aardverschuivingen ([11](#)). In Engeland en Wales kwamen 840 meer mensen om dan normaal voor de tijd van het jaar ([12](#)). Deze stijgingen zouden "uiterst onwaarschijnlijk" zijn geweest zonder de invloed van door de mens veroorzaakte klimaatverandering. Volgens Mariam Zachariah, een research associate van het Imperial College London, zou de kans om deze temperatuurpieken overdag te zien zonder antropogene klimaatverandering 1-op-1.000 zijn geweest ([12](#)).

Alles wijst er dus op dat we ons zullen moeten voorbereiden op een toekomst van nog ergere rampen, want het is virtueel zeker dat het nog warmer zal worden. Het Antarctische zee-ijs heeft in het eerste kwartaal van het jaar, evenals bijna de hele maand juli, een record laag niveau bereikt, terwijl de omvang van het Arctische zee-ijs aan de onderkant van het historische bereik heeft gelegen. Ook te vermelden is dat er in België een recordbrekende temperatuur van **22,4 °C** werd gemeten op 28 oktober, meer dan een maand in de herfstmeer. Dat is

zo'n **9 °C warmer dan de gemiddelde temperatuur eind oktober**. Nog meer temperatuurrecords werden gebroken in Europa: op 31 december steeg de temperatuur in België tot boven de **17 °C** ten gevolge van aanvoer van tropische lucht uit het Zuiden!

Volgt nu een overzicht van de geschiedenis van de klimaatverandering. Gegevens uit de volgende paragrafen komen uit het **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 6th Assessment Report (AR6), Working Group I (WG I)**, the Physical Science Basis, Hoofdstuk 1, sectie 1.3) ([13](#)).

1.2 Klimaat en Weer

Onder **klimaat** verstaat men het **langetermijngemiddelde (~30 jaar)** van de conditie van de atmosfeer in termen van temperatuur, vochtigheid, atmosferische druk, wind, neerslag en ijs in een gegeven gebied van de aarde. Kwantitatief geeft het klimaat het gemiddelde (meestal de mediaan) en de betrouwbaarheidsgrenzen van deze data weer.

Het **weer**, daarentegen, is de gemiddelde conditie van deze atmosferische data in een bepaald gebied gedurende **korte periodes**. De maand-maand, jaar-jaar en decadale fluctuaties vormen de natuurlijke variaties binnen een bepaald klimaatype.

Het klimaatsysteem is een **interactief systeem bestaande uit 5 componenten**: de atmosfeer, het landoppervlak, de hydrosfeer (oceanen, zeeën, rivieren, meren, watervervoerende lagen), de cryosfeer (landijs, zee-ijs, gletsjers, sneeuwvlakten) en de biosfeer (levende organismen, dood organisch materiaal).

Het klimaatsysteem is complex en chaotisch en wordt bepaald door verschillende **klimaatdrivers** en **feedbacks**. De omvang en de manieren waarop deze drivers en feedbacks werken zijn niet volledig voorspelbaar. Vandaar dat klimaatvariatiën en klimaatverandering nooit met absolute zekerheid voorspeld kunnen worden. Voorspellingen worden geformuleerd als **een bereik tussen bovenste en onderste waarden onder bepaalde scenario's**, met onderste en

bovenste betrouwbaarheidsintervallen. Statistisch significante afwijkingen van de gemiddelde conditie worden **anomalieën** genoemd.

De belangrijkste drivers van het klimaat zijn de inkomende energie van de zon en de reflectie, absorptie en re-emissie van energie binnen de atmosfeer, wolken en zee- en ijsoppervlaktes.

Een klimaat in evenwicht is een **dynamisch evenwicht**. Niet in alle locaties op aarde is de energiebalans in evenwicht. De verdeling van de onevenwichten over de planeet vormt de oorsprong van **verschillende soorten klimaat** (bergklimaat, zeeklimaat, woestijnklimaat, tropisch en subtropisch klimaat etc.).

De meeste inkomende zonne-energie wordt opgevangen in de tropen en subtropen en wordt dan herverdeeld naar midden- en hoge breedtegraden door wind- en oceaanstromingen, aangedreven door de rotatie van de aarde. Elke variatie in de factoren die een blijvende invloed hebben op de inkomende en/of uitgaande energie of die de energieverdeling wijzigen, zal het klimaat beïnvloeden.

Voor sommige delen van het klimaatsysteem is de relatie tussen oorzaak en reactie lineair, maar in andere gevallen is deze relatie meer complex, gekenmerkt door *hysteresis*, of niet-additieve combinaties van reacties.

De dagelijkse weerschommelingen vormen de **natuurlijke variatie binnen elke klimaatzone**. **Klimaatvariabiliteit verwijst naar veranderingen in de energiebalans over korte tijdschalen**. Sommige klimaatvariaties zijn cyclisch, terwijl andere gebaseerd zijn op specifieke gebeurtenissen, zoals grote vulkaanuitbarstingen. Variabiliteit kan klimaatverandering tijdelijk versnellen of wijzigingen ervan maskeren. Klimaatvariatie kan seizoensgebonden of niet-seizoensgebonden zijn. De **4 seizoenscycli** (lente, zomer, herfst en winter) zijn typisch voor hogere breedtegraden, terwijl er in tropische regio's **2 seizoenscycli, regenseizoen (moesson) en droog seizoen** worden gezien.

Klimaatverandering heeft te maken met een verandering in de energiebalans in functie van de tijd en variërend van decennia tot miljoenen jaren. Wijzigingen kunnen wereldwijd zijn of alleen betrekking hebben op een regio of een plane-

tair halfmond. Reacties van het klimaatsysteem kunnen verschillen tussen regio's. Klimaatverandering kan ook de klimaatvariabiliteit beïnvloeden en extreme weersomstandigheden uitlokken.

Hieronder geven we een overzicht hoe onze kennis en begrip over klimaatverandering evolueerde. De gegevens komen uit (IPCC AR6 WG I, sectie 1.3) (13).

1.3 Temperatuur en luchtdruk aan de oppervlakte van land en oceanen

Onze kennis van het klimaat startte in de 17^{de} eeuw, toen de **thermometer** en de **barometer** werden uitgevonden. In de 19^{de} eeuw begon men weersvoorspellingen te maken op basis van instrumentele metingen van **temperatuur** en **luchtdruk**. Er ontstonden netwerken van nationale en koloniale stations die deze metingen registreerden. Nog in de loop van de 19^{de} eeuw begon men metingen uit te voeren van **windsnelheid, stroming, neerslag, luchtdruk** en **temperatuur** op zee, waarmee het begin werd gemaakt van het langste ononderbroken quasi-wereldwijde instrumentele record. Begin 20^{ste} eeuw werd een systeem voor het uitwisselen van weersvoorspellingen georganiseerd, dat alle continenten behalve Antarctica besloeg. Regelmatige compilatie van klimatologische gegevens verspreid voor de ganse wereld begon in 1905 met de *Réseau Mondial* en compilaties in de *World Weather Records*. In de loop van de 20^{ste} eeuw werden ze verder aangevuld en geperfectioneerd.

In de tweede helft van de 20^{ste} eeuw deden **computers** hun intrede, wat de mogelijkheden van klimatologische instrumentele indicatoren sterk deed toenemen. Ook werden oudere gegevens teruggevonden uit handgeschreven records en groeide het aantal records dat werd gebruikt in gepubliceerde wereldwijde tijdreeksen van landtemperatuur. Een pioniersstudie van de periode 1880-1935 gebruikte minder dan **150 stations**. Een studie van 1880-2005 omvatte reeds **4300 stations**. Een studie van de periode 1753-2011 omvatte voorheen ongebruikte stationsgegevens, wat voor een totaal van **36.000 stations** zorgde. Recente versies van deze dataset omvatten meer dan 40.000 landstations. Verschillende centra, waaronder **National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)**, **Hadley**, en **Japan Meteorological Agency (JMA)**, verzamelden

elk *Sea Surface Temperature (SST)*-datasets die onafhankelijk werden berekend op basis van instrumentele records.

In de jaren 2000 werden **aanpassingen voor bias** (fouten als gevolg van verschillende meetmethoden) uitgevoerd die grote verbeteringen van SST-gegevens inhielden. SST- en landgebaseerde temperaturen werden opgenomen in datasets van oppervlaktetemperatuur en verwerkt door meerdere onderzoeksgroepen, waaronder *Berkeley Earth*, *China Meteorological Administration (CMA)*, *Hadley-CRU*, *JMA*, *NASA* (National Aeronautics and Space Administration) en *NOAA*. Elke groep verzamelde de ruwe meetgegevens, brachten verschillende aanpassingen aan voor niet-klimatologische bias (zoals **stedelijke hitte-eilandeffecten**) en oneffenheden in geospatiale en temporele bemonstering.

IPCC AR5 WG I, stelde vast dat het wereldgemiddelde van de oppervlaktetemperatuur (GMST) van 1880 tot 2012 met 0,85°C was toegenomen en ontdekte dat **sinds 1850 elk van de drie decennia na 1980 opeenvolgend warmer was dan alle voorgaande jaren** (14). De SST's, vooral die welke 's nachts werden gemeten, werden in toenemende mate ook gebruikt om variabiliteit en langetermijntrends in de data te onderzoeken.

1.4 Temperatuur, vochtigheid, ozon (O₃) en waterdamp in hogere luchtlagen

Gegevens over **hogere lagen in de troposfeer** kwamen aanvankelijk uit metingen op bergtoppen, in ballonnen en vliegtuigen, maar de bovenste troposfeer en stratosfeer werden niet systematisch onderzocht tot het **radiosonde-netwerk** (weerballonnen) in de jaren 1940-50 ter beschikking kwam. Deze data zijn het langste ononderbroken quasi-wereldwijde record van de verticale dimensie van de atmosfeer.

Sinds 1978 hebben **Microwave Sounding Units (MSU)**, gemonteerd in **satellieten** in een baan om de aarde, een tweede gegevensset over temperatuur, vochtigheid, ozon en waterdamp op grote hoogte in de atmosfeer geïntroduceerd. In de loop van de tijd hebben deze satellietgegevens meerdere aanpassingen gekregen. Ondanks deze aanpassingen bleven er echter aanzienlijke verschillen bestaan in de temperatuurtrends van oppervlakte-, radiosonde- en sa-

tellietwaarnemingen en tussen gemodelleerde en satelliet-afgeleide troposferische opwarmingstrends. In de jaren 2000 brachten **Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)** en **radiooccultatie (GNSS29-RO)** nieuwe manieren aan om de temperatuur op grote hoogte te meten. GNSS-RO is een nieuwe onafhankelijke, absoluut gekalibreerde data-bron die de breking van radiofrequentie-signalen van het **Global Navigation Satellite System (GNSS)** gebruikt om temperatuur, druk en waterdamp te meten.

1.5 Het versterkt broeikaseffect

In de 19e eeuw werden de mechanismen die warmte vasthoudend zijn in de atmosfeer onderzocht. Foote (1856) mat de opwarming door CO₂ en betoogde dat hogere concentraties in de atmosfeer de oppervlaktetemperatuur van de aarde zouden kunnen verhogen. Waterdamp, ozon, CO₂ en bepaalde koolwaterstoffen bleken zonnestraling te absorberen, wat resulteerde in opwarming (Tyndall, 1861). Meer bepaald bleken deze gassen de zonnestraling te absorberen en deze heruit te zenden als infrarode warmtestraling, waardoor de atmosfeer opwarmt. Deze opwarmende werking werd **het broeikaseffect** genoemd. Vandaag noemt men deze opwarming het **'versterkt' broeikasgas effect**, omdat er steeds meer CO₂ in de atmosfeer terecht komt vanuit antropogene bron en zich toevoegt aan het natuurlijke concentratie van CO₂ afkomstig van vulkanen.

Het idee van een natuurlijke **biogeochemische koolstofcyclus** werd eveneens in de 19de eeuw ontwikkeld. Men stelde vast dat CO₂, uitgestoten door vulkanen, uit de atmosfeer wordt verwijderd door een combinatie van verwerking van silicaatgesteenten, neerslag in diepzeesedimenten, absorptie in oceanen en biologische opslag in planten en schaaldieren. Op tijdschalen van miljoenen jaren werd gevonden dat compressie van fossiel organisch materiaal steenkool, olie en aardgas vormt (Chamberlin, 1897; Ekholm, 1901).

In de jaren 1890 berekende Arrhenius de effecten van verhoogde CO₂-concentratie op de temperatuur van de aarde en Högbom besloot dat de wereldwijde verbranding van kolen (toen ongeveer 500 megaton/jaar) de natuurlijke opname van CO₂ door verwerking in silicaatgesteenten al volledig had gecompenseerd. Toen het kolenverbruik tien jaar later reeds 900 megaton/jaar bedroeg,

trok Arrhenius de aandacht erop dat antropogene (door de mens geproduceerde) CO₂, uiteindelijk de planeet zou opwarmen. Door de records van 147 stations over de hele wereld te analyseren, berekende Callendar in 1938 dat atmosferische opwarming boven land met 0,3-0,4°C was gestegen tussen 1880 en 1935. Hij schreef ongeveer de helft van deze opwarming toe aan antropogene CO₂. In 1896 berekende Arrhenius dat een verdubbeling van de atmosferische concentratie van CO₂ een opwarming van 5-6°C zou veroorzaken. Het was echter pas in de jaren 1950 dat de belangrijke rol van CO₂ in de energiebalans van de atmosfeer algemeen werd aanvaard, althans in de wetenschappelijke wereld.

Revelle en Keeling richtten tijdens het Internationaal Geofysische Jaar van 1957 tot 1958 CO₂-meetstations op in Antarctica en Hawaï. Deze stations hebben de stijgende atmosferische CO₂-concentraties gevolgd van 315 ppm in 1958 tot 414 ppm in 2020. De **Greenhouse Gases Observing Satellite** (GOSat) werd in 2009 gelanceerd. Sinds 2014 bevinden er zich twee **Orbiting Carbon Observatory-satellieten** in een baan om de aarde.

Een ander fenomeen van CO₂ in de atmosfeer is zijn opname in de oceaan en omzetting tot bicarbonaat en koolzuur. Het leidt tot verzuring van het oceaantwater. Ongeveer 20-30% van de door mensen geproduceerde CO₂ wordt door de oceaan opgenomen. Het IPCC AR5 WG I rapport heeft vastgesteld dat de pH van het oppervlaktewater van de oceaan met 0,1 pH-eenheid was gedaald (zuurder geworden) sinds de aanvang van het industriële tijdperk (*hoge betrouwbaarheid*).

1.6 Warmteopslag in de oceanen

De vroegste warmtemetingen in de open oceaan dateren uit de jaren 1770. Van 1872 tot 1876 werden de wereldwijde oceaantemperaturen gemeten tot op een diepte van 1700 m door het onderzoeksschip **HMS Challenger**. Tegen 1900 gebruikten onderzoeksschepen instrumenten zoals Nansen-flessen (genoemd naar de uitvinder Nansen) en **Mechanische Bathy Thermographs** (MBT's) om temperatuurmetingen uit te voeren in de bovenste 150 m in gebieden die van belang waren voor militaire- en commerciële scheepvaart. Vanaf 1967 werden **eXpendable Bathy Thermographs** (XBT's) ingezet op wetenschappelijke en commerciële schepen om de temperatuur te meten tot een diepte van 700 m.

De verzameling van oceaangegevens werd in de jaren 1980 uitgebreid met het **Tropical Ocean Global Experiment** (TOGA). Mariene oppervlakteobservaties werden verzameld in het midden van de jaren 80 in de **International Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set** (ICOADS) en werden uitgebreid tot de periode 1662–2014 met behulp van teruggevonden mariene records en metadata. Met het **Argo submersible float network**, dat in de vroege jaren 2000 werd ontwikkeld, werden de eerste systematische temperatuur data verzameld in wereldwijde oceanen van 700 tot 2000 m.

De oceanen hebben een **warmtecapaciteit die ongeveer 1000 keer groter is dan die van de atmosfeer**. Ze slaan de overgrote hoeveelheid energie op die door de aarde wordt vastgehouden. Zeestromingen transporteren de opgenomen warmte over de hele wereld en brengen ze van het oppervlak naar de grootste oceaandiepten over tientallen jaren tot eeuwen. **De oceaan is gekenmerkt door thermische traagheid**; ze matigt snellere veranderingen in stralingsforcering op het land en in de atmosfeer, en bereikt pas na honderden duizenden jaren een volledig evenwicht met de atmosfeer (Yang en Zhu, 2011).

Het AR5 WG I-rapport (14) stelde in 2013 met *grote zekerheid* vast dat de opwarming van de oceaan verantwoordelijk was voor meer dan 90% van de extra energie die tussen 1971 en 2010 door het klimaatsysteem werd gecapteerd. De opwarming van de atmosfeer komt overeen met slechts 1% van de extra energie die in die periode was gecapteerd.

1.7 Zeespiegelstijging

In de 18e eeuw werd het zeeniveau bepaald door **getijmeters**. Het was echter moeilijk om deze metingen te vertalen naar het gemiddelde wereldwijde zeeniveau (Global Mean Sea Level, GMSL) over de ganse oceaanoppervlakte, omdat hun ruimtelijke spreiding beperkt was tot continentale kusten en eilanden, en de metingen relatief waren aan de lokale kustomstandigheden die bij verloop van tijd verticaal kunnen verschuiven. Ook is de aantrekkingskracht van de aarde niet overal gelijk, wat eveneens het zeespiegelniveau kan wijzigen op bepaalde locaties.

In de jaren 1990 werd **radarhoogtemeting van GMSL door satellieten** geïntroduceerd, wat getijmeter-records aanvulde met metingen met een veel grotere ruimtelijke dekking. IPCC AR5 WG I stelde vast dat de GMSL in de periode 1901-2010 met 0,19 [0,17 - 0,21] m was gestegen en dat **de snelheid van de GMSL-stijging was toegenomen van 2,0 [1,7 - 2,3] mm/jaar in de periode 1971-2010 tot 3,2 [2,8 tot 3,6] mm/jaar tussen 1993 en 2010**. De opwarming van de oceaan droeg zeer waarschijnlijk (*very likely*) bij tot 0,8 [0,5 tot 1,1] mm/jaar in de periode 1971-2010, waarbij het grootste deel van die bijdrage afkomstig was van de bovenste 700 m van de oceaan. Nog volgens IPCC AR5 leverde deze **uitzetting, samen met het verlies van gletsjermassa**, de belangrijkste bijdrage aan de GMSL-stijging in de 20e eeuw (*hoge betrouwbaarheid*).

1.8 Landijs, zee-ijs en gletsjers

Detectie door satellieten zorgde voor een revolutie in het onderzoek naar de **cryosfeer** (land en zee bedekt met ijs en sneeuw). Satellietbeelden en meting van sneeuwbedekking begonnen in 1966, gevolgd door observaties van land- en zee-ijs in het midden van de jaren zeventig. Tot het 3^{de} IPCC AR-rapport (TAR) hadden onderzoekers onvoldoende gegevens om te bepalen of de Groenlandse en Antarctische ijskappen aan het krimpen of groeien waren. Het zeeijsoppervlak daarentegen werd continu gemonitord door **microgolven** sinds 1979. Door zwaartekrachtmetingen, en verbeterde kennis van de oppervlaktemassa-balans toonde het IPCC AR5-rapport duidelijk **ijsverlies aan van arctische en antarctische ijskappen**. Na 2000 werd **radarinterferometrie** door satellieten ingevoerd en werden snelle veranderingen in ijsoppervlakte aan de randen van ijskappen vastgesteld. Datasets voor ijsdikte kwamen later tot stand uit **opwaartse sonarprofilering** door onderzeeërs.

De lengte van gletsjers werd al tientallen jaren tot eeuwen gevolgd. Internationaal gecoördineerde activiteiten van de **World Glacier Monitoring Service** verzamelden wereldwijde gletsjerlengte- en massabalans, globale gletsjercontouren en ijsdikte van ongeveer 1100 gletsjers. IPCC AR5 WG I besloot dat in de afgelopen twee decennia de gletsjers bijna wereldwijd zijn blijven krimpen en het Arctische zee-ijs en de sneeuwbedekking op het noordelijk halfrond in omvang zijn blijven afnemen (*hoge betrouwbaarheid*).

1.9 Reconstructies van paleoklimaat aan de hand van *proxies*

In de 19e eeuw werd de hypothese naar voor gebracht dat er zich in het verre verleden grote verschuivingen hebben voorgedaan in het klimaat op aarde, van ijstijden tot heel warme periodes. Ze worden **Paleoklimaten** genoemd. Centraal in dit onderzoek waren de zogenaamde **proxies**. Dat zijn fysische parameters, die teruggevonden werden in sedimenten, ijsmassa's, fossielen en resten van dieren en planten, en kenmerken hebben opgeslagen van bepaalde klimaatparameters in het verre verleden. Ze hielpen het onderzoek naar de oorzaken van de klimaatveranderingen en hebben totaal nieuwe inzichten in de huidige antropogene klimaatverandering gebracht. Ze onthulden een **sleutelrol voor CO₂ en andere broeikasgassen** in het tot stand komen van de klimaatverandering zowel in het recente (zie **Figuur 1.6**) als het verre (zie **Figuur 1.7**) verleden.

