

Bijzondere kwaliteiten van water (9) – klimaat: de onstuimige wisselwerking tussen water en warmte

Hans van Sluis (gepensioneerd watertechnoloog DHV)

Hoewel kooldioxide (CO₂) als de hoofdschuldige aan de opwarming van de aarde is aangemerkt, is waterdamp het belangrijkste broeikasgas. Het wordt echter zelden zo benoemd, terwijl de thermische eigenschappen en het gedrag ten aanzien van straling minstens zo zwaarwegend zijn. Bovendien is er in de atmosfeer veel meer water aanwezig. De exclusieve aandacht voor CO₂ als oorzaak van de opwarming is daarom moeilijk te rechtvaardigen. In dit artikel wordt aandacht gevraagd voor de rol van water in het klimaatprobleem en voor watergerelateerde oplossingsstrategieën.

De bekendste anomalieën van water [1] hangen samen met thermische verschijnselen. Voorbeelden zijn het dichtheidsmaximum bij 4 °C, het hoge kookpunt en de grote warmtecapaciteit en de extreem hoge waarden van de smelt- en verdampingswarmte. Met de warmte die vrijkomt bij condensatie van 1 kg stoom kan 7 liter water aan de kook worden gebracht, of 1750 m³ lucht 1 °C opgewarmd. De soortelijke warmte van water vertoont bij 37 °C een minimumwaarde.

Door deze en andere anomalieën kan water de drager zijn van de levensverschijnselen op aarde [2]. De vorming van water uit de elementen waterstof en zuurstof verloopt explosief en er komt een grote hoeveelheid warmte bij vrij. In de industrie is water een belangrijk transportmiddel van warmte, zowel vloeibaar als in de vorm van stoom.

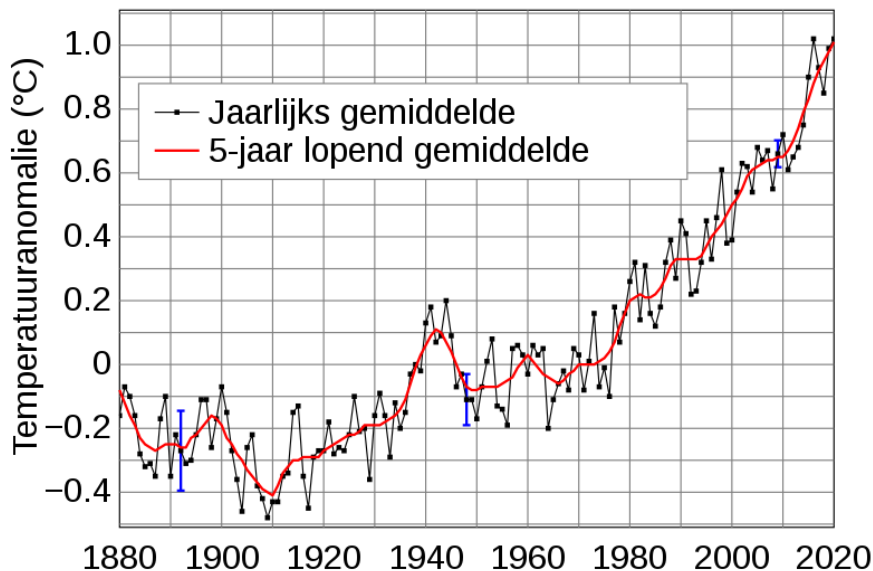


Afbeelding 1. In de negentiende eeuw heeft het samenspel van water en vuur de opwekking van energie (en daarmee het transport en vele andere toepassingen) met een enorme sprong vooruit gebracht

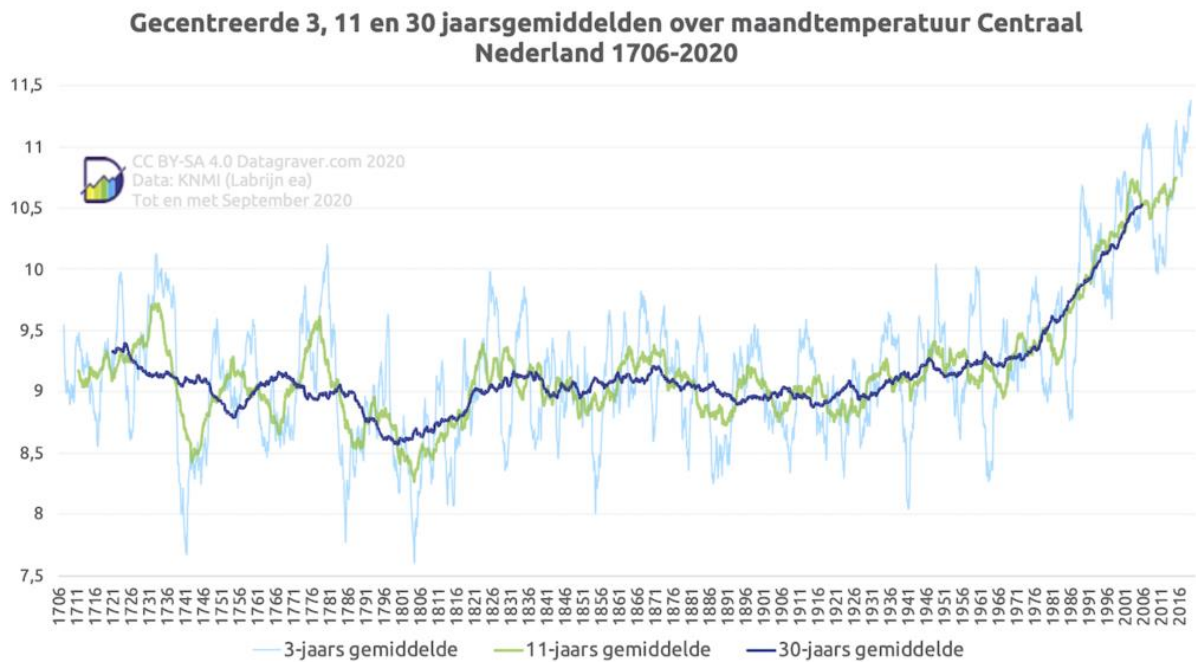
Weersverschijnselen berusten op een dynamische interactie van warmte en water in de aardse dampkring. Ze vertonen een eindeloze variatie in tijd en ruimte, maar over langere perioden bezien kan worden gesproken van verschillende klimaattypen, die voor bepaalde regio's en zones kenmerkend zijn.

Opwarming van de aarde

Tegenwoordig warmt de aarde op. Er is een zekere consensus over oorzaken, maar zeker nog geen eensgezindheid over mogelijke oplossingen. De recente catastrofale overstromingen en bosbranden onderstrepen de urgentie van zowel een goede analyse als voortvarende besluiten over maatregelen. Toch is het zaak de theorievorming kritisch te blijven volgen. Door de veelheid van betrokken disciplines en het ontbreken van de mogelijkheid tot verificatie is het gevaar voor wetenschappelijke tunnelvisie niet denkbeeldig. De directe aanleiding om er in dit artikel bij stil te staan is dat in de bestaande klimaatmodellen de - cruciale - rol van water niet goed uit de verf komt.



Afbeelding 2. Recente ontwikkeling van de wereldwijde land-oceaan-temperatuurindex, een maat voor de opwarming van de aarde. Ten opzichte van voorgaande eeuwen is een duidelijke versnelling te zien [3]

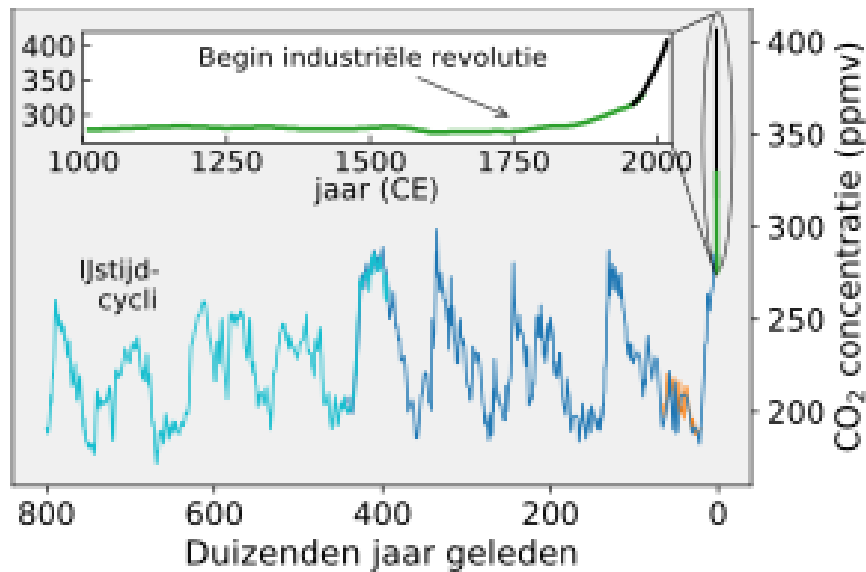


Afbeelding 3. Tijdreeks van gemiddelde temperaturen in Nederland 1706-2020 [3]

Broeikashypothese

De oppervlaktetemperatuur van de aarde neemt sinds enige decennia veel sneller toe dan daarvoor (afbeeldingen 2 en 3). Tevens treden er gerelateerde veranderingen op in weerspatronen. Ook ecologische effecten worden wereldwijd waargenomen, maar specifiek bijvoorbeeld in de Friese meren [4]. Een verstoring van de warmtehuishouding is als oorzaak aangemerkt. Men spreekt van een 'versterkt broeikaseffect', dat ontstaat doordat het evenwicht tussen ingevangen en uitgestraalde warmte-energie van de aarde als geheel is verschoven door een veranderde samenstelling van de atmosfeer. Van de zogenoemde broeikasgassen die voor de verminderde warmte-uitstraling verantwoordelijk zijn, zijn waterdamp en kooldioxide (CO₂) de belangrijkste.

De hoeveelheid kooldioxide in de atmosfeer is gedurende vele duizenden jaren min of meer stabiel geweest. In het ritme van de ijstijdcycli varieerde het gehalte tussen ongeveer 200 en 250 delen per miljoen (ppm) (afbeelding 4). Veranderingen gaan zo langzaam dat de concentratie van atmosferisch kooldioxide op een bepaald moment steeds overal op aarde gelijk is.

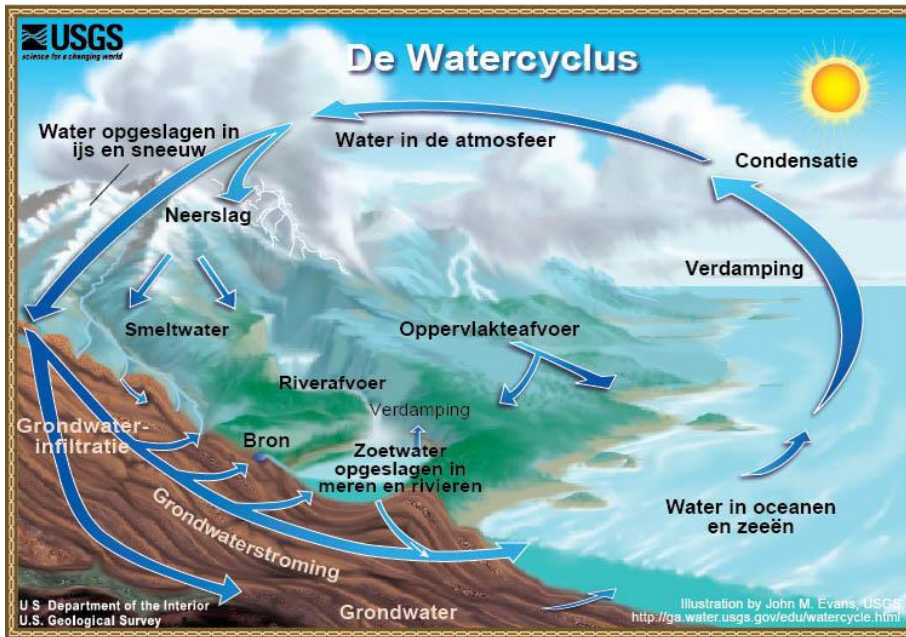


Afbeelding 4. Verloop van de kooldioxide-concentratie in de atmosfeer in het verre en het nabije verleden [3]

Sinds het begin van de industriële revolutie rond het jaar 1750 is de concentratie ervan echter geleidelijk toegenomen van circa 280 ppm tot meer dan 410 ppm. De verbranding van fossiele brandstoffen, de grootschalige ontbossing en het verlies van organische koolstof uit de bodem ten gevolge van de industriële landbouw worden gezien als de belangrijkste menselijke invloedsfactoren. Water in de atmosfeer is een veel dynamischer factor dan kooldioxide. Door natuurlijke processen varieert de luchtvochtigheid soms van uur tot uur en komen er grote locale verschillen voor. Ook in de hoogte is het watergehalte van de atmosfeer zeer veranderlijk. Langetermijntrends wijzen op verandering van het klimaat. De hoeveelheid waterdamp in de lucht is niet direct door de mens te beïnvloeden. Wel zijn er indirecte invloeden. Daarop wordt hieronder ingegaan.

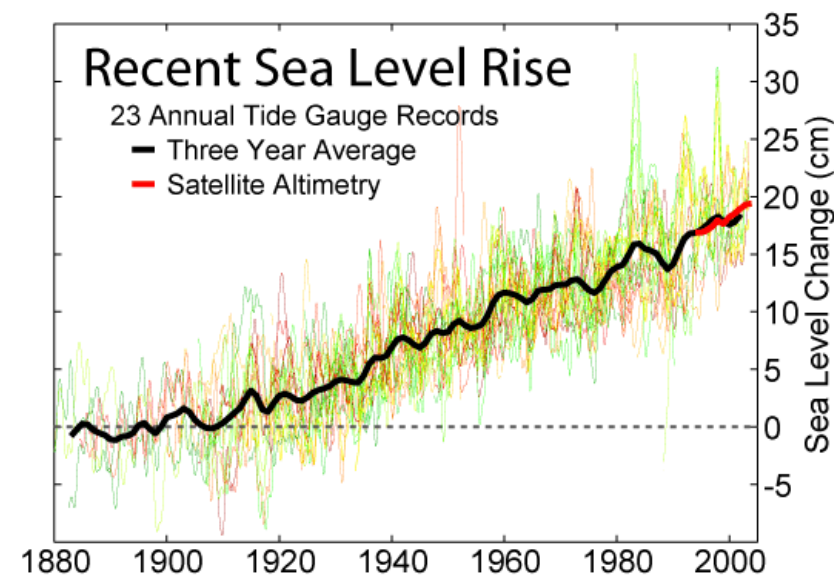
Effecten van de opwarming op de waterkringloop

Water omhult de aarde als een mantel: de hydrosfeer. Daarbinnen worden oppervlaktewater, grondwater en het water in de atmosfeer onderscheiden. Door natuurlijke stromingsprocessen vindt menging plaats en uitwisseling tussen de compartimenten (afbeelding 5). De warmte van de zon, de zwaartekracht en de aardrotatie zijn de belangrijkste drijvende krachten.

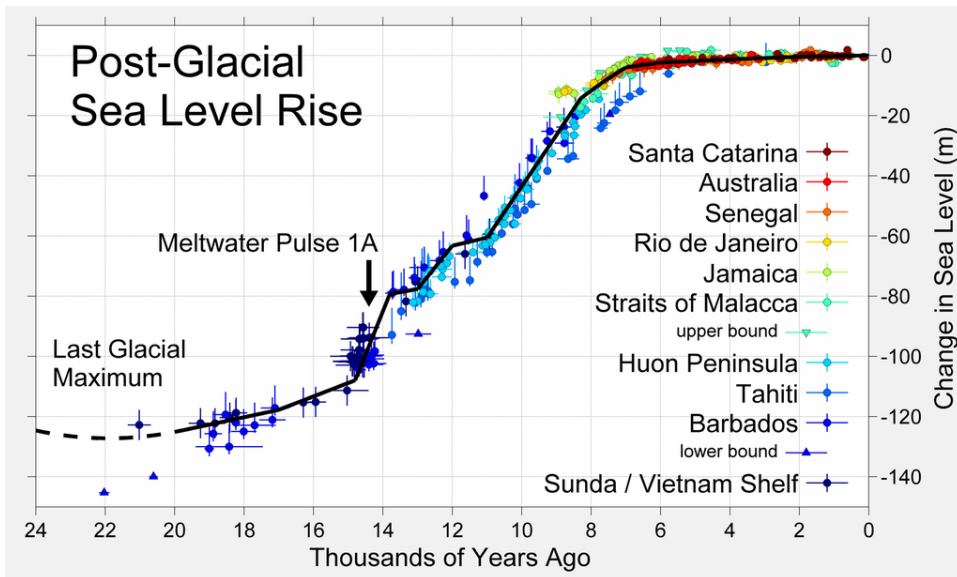


Afbeelding 5. De waterkringloop op aarde

De opwarming van de aarde intensiveert de waterkringloopprocessen. Weersextremen worden versterkt en zowel wateroverlast als extreme droogte komt vaker voor. Naast de meteorologische gevolgen van de opwarming tasten directe ingrepen van de mens de uitwisseling in het waterkringloopstelsel aan en maken dit minder stabiel. Beide effecten samen maken dat de watervoorraden van landijs, gletsjers en hooggelegen grondwaterbronnen vrijkomen, wat toenemende wateroverlast op het land en een globale stijging van de zeespiegel veroorzaakt. Dit vormt meer en meer een bedreiging voor de – vaak dichtbevolkte – oever- en kustzones (afbeelding 6). Ten opzichte van de aan de laatste ijstijd gerelateerde zeespiegelvariatie (afbeelding 7) is de actuele stijging echter gering.



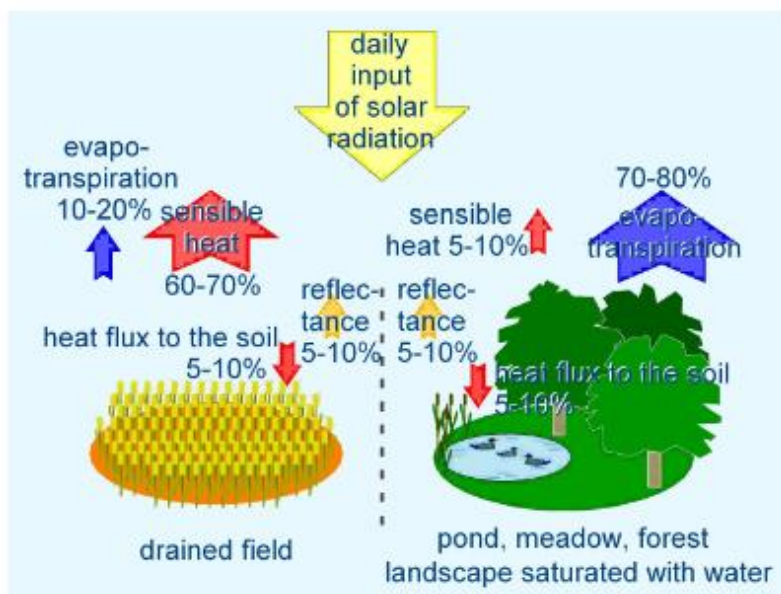
Afbeelding 6. Recente stijging van de zeespiegel [5]



Afbeelding 7. Zeespiegelstijging sinds de laatste ijstijd [5]

Klimaatverandering en waterhuishouding beïnvloeden elkaar

Wateroverlast en zeespiegelstijging worden in de regel bestreden met dijkverhoging en versnelde afvoer van overtollig water. Daarnaast zijn sinds enige tijd herstel van de sponswerking van de bovenlopen van riviersystemen en afremmen van afvoergolven tot belangrijke mitigerende maatregelen. Deze strategieën, die beogen het functioneren van de waterinfrastructuur klimaatproof te maken, gaan echter geheel voorbij aan de grote invloed die landinrichting en bodemgebruik via dezelfde waterhuishouding hebben op de circulatiestromen van de waterkringloop en daarmee op klimaatverandering.



Afbeelding 8. Transformatie van de zonne-energie op een gedraineerde en een niet-ontwaterde bodem. Een droge bodem wordt heet en geeft overwegend voelbare warmte af; een vochtige bodem blijft door evapotranspiratie koel en geeft de energie vooral als latente warmte af [6]

Het wateropnemend vermogen van de aardbodem varieert van plaats tot plaats zeer sterk, afhankelijk van het bodemtype en het grondgebruik. Een doorlatende, vochtige bodem die bedekt is met een dichte vegetatielaag neemt veel neerslag op en buffert het water. Verdamping (evapotranspiratie) van een deel van de neerslag houdt de bodem en de bovenstaande luchtkolom koel, omdat veel minder voelbare warmte wordt afgegeven (afbeelding 8).

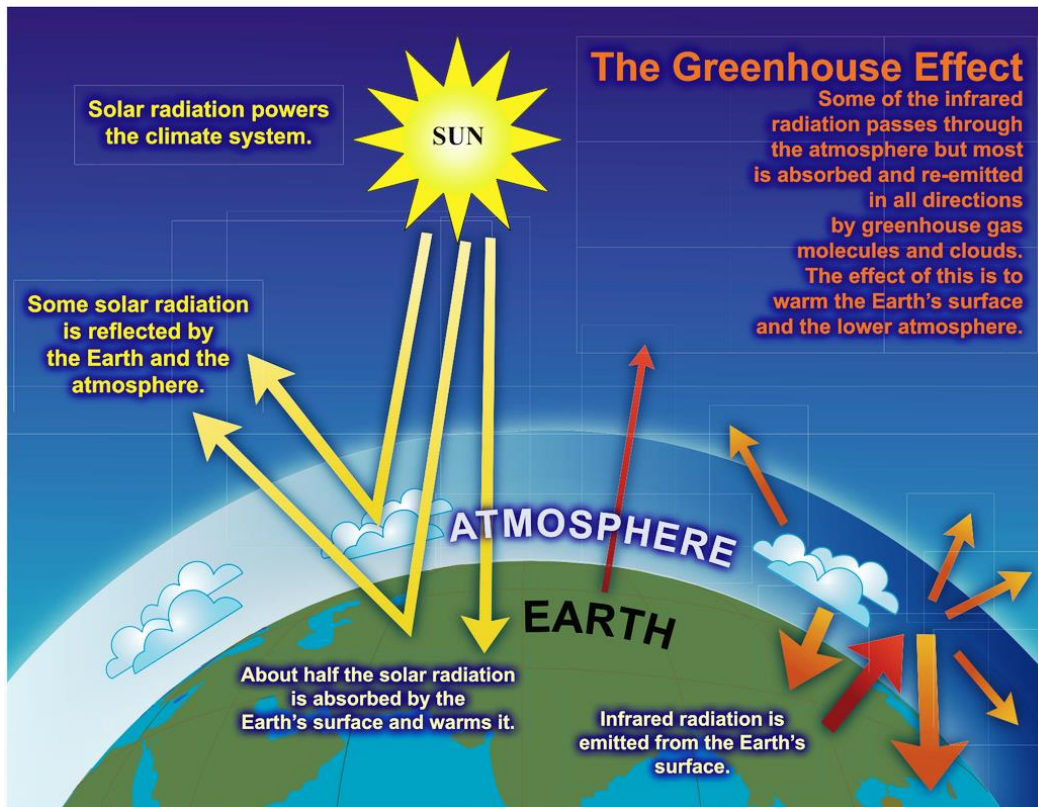
Menselijke ingrepen in de waterhuishouding hebben in stedelijke gebieden de bodem nagenoeg ondoorlatend gemaakt. Ook daarbuiten heeft in cultuur gebrachte grond geen dicht vegetatiedek meer. De grotendeels verdroogde bodem warmt veel sneller op en houdt de warmte lang vast. Dit proces is al sinds het ontstaan van de landbouw en het begin van de stedelijke beschaving gaande, maar is in de afgelopen 200 jaar door de groei van de wereldbevolking en de economische ontwikkeling sterk geïntensiveerd. Door ont- en afwatering en landbouwmechanisatie in combinatie met het gebruik van kunstmest is bovendien de bodem verregaand gemineraliseerd, waardoor het waterbindend vermogen sterk is afgenomen [6]. Voor bodem- en vegetatiedeskundigen uit de hele wereld is dit aanleiding om de causaliteit met betrekking tot klimaat en water om te keren. Zij stellen dat het hedendaagse bodemgebruik – met de daaraan gekoppelde waterhuishouding – een belangrijke oorzaak is van de klimaatproblemen [6], [7], [8].

Gekoppelde warmte- en waterstromen in de atmosfeer

Met een indrukwekkende wereldwijde inspanning is, gecoördineerd door het internationaal klimaatveranderingspanel (IPCC), in de afgelopen 30 jaar de kennis van atmosferische processen en van de herkomst en invloed van broeikasgassen op een hoger plan gebracht. Recent zijn nieuwe inzichten en bijgestelde prognoses gepubliceerd in een voortgangsbericht [9].

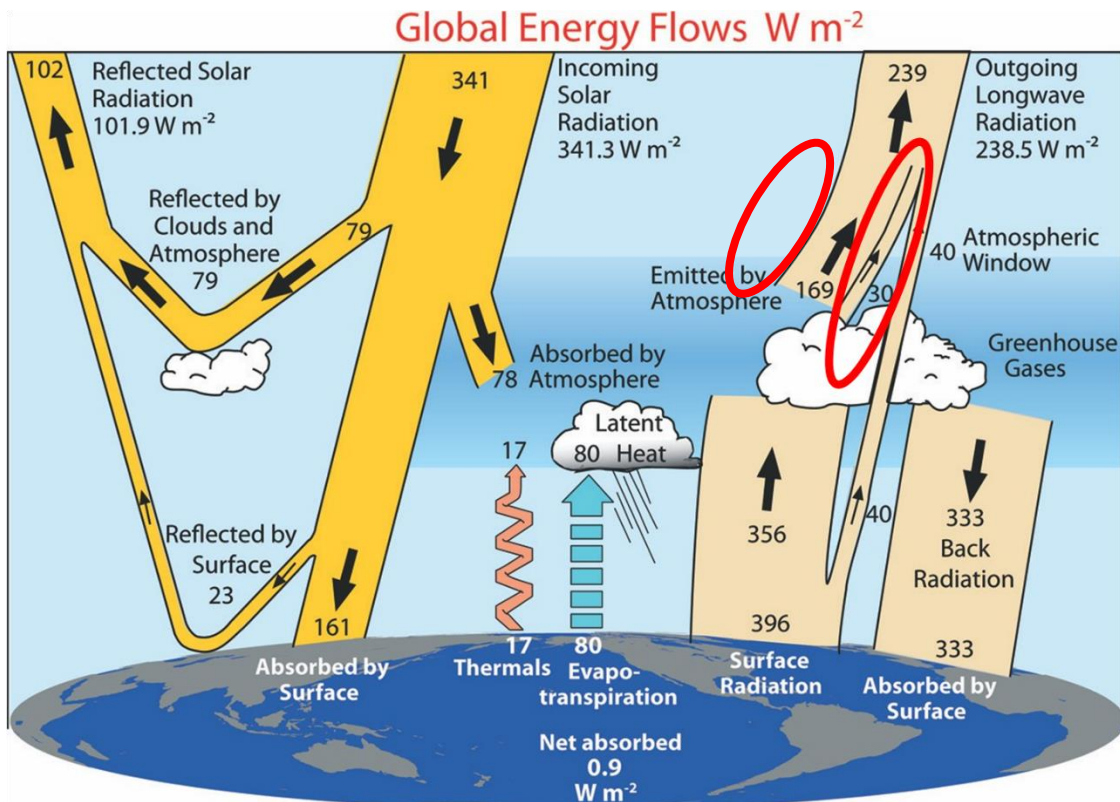
De klimaatwetenschap berust in hoofdzaak op trendmatige beschrijvingen van de toestand van de aarde en de atmosfeer. Over de diepere oorzaken is jarenlang gediscussieerd en pas sinds relatief kort worden antropogene factoren als belangrijke drijvende kracht beschouwd.

De opwarming van de aarde beschrijft de – versnelde - temperatuurstijging die zich sinds het begin van de industriële revolutie heeft voorgedaan in de atmosfeer, de hydrosfeer en de bovenlaag van de bodem. Deze gebieden omvatten tezamen nagenoeg de volledige biosfeer van de aarde. De zon en het binnenste van de aarde zijn beschouwd als externe factoren, die niet te beïnvloeden zijn. Warmteoverdracht verloopt op drie manieren, die naast elkaar kunnen bestaan: straling (afbeelding 9), geleiding (conductie) en transport door stroming (convectie).



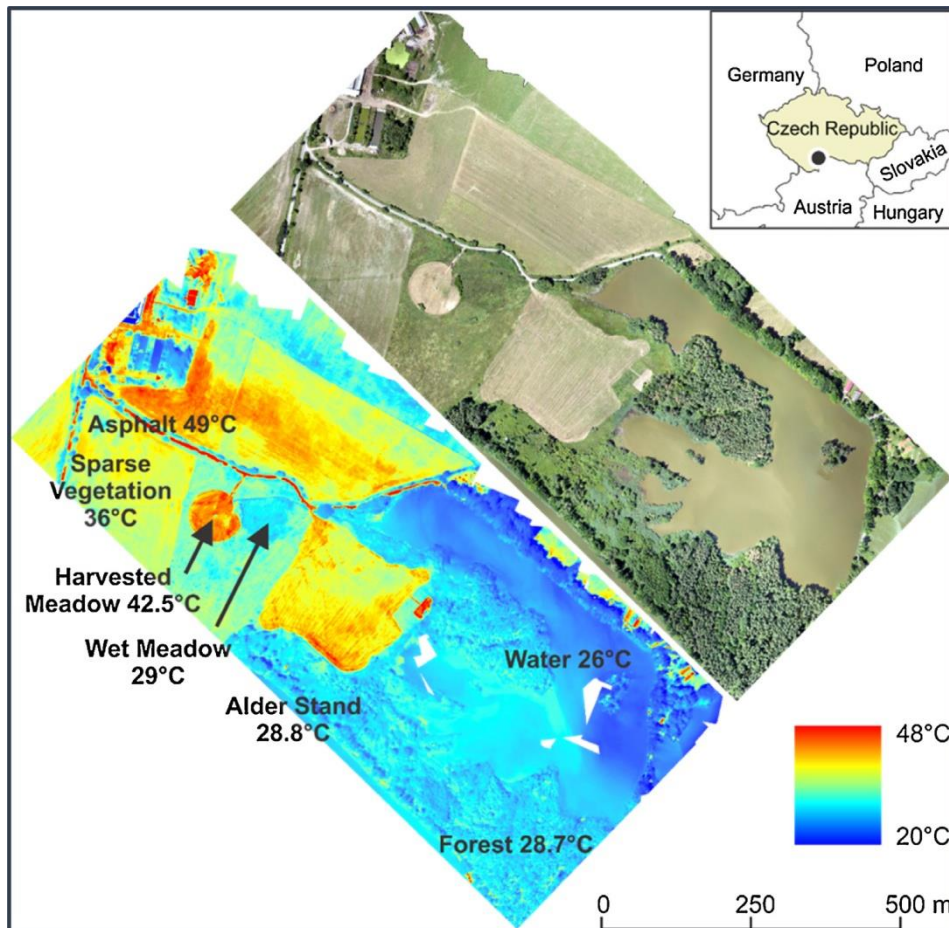
Afbeelding 9. Stralingsprocessen van het broeikaseffect

De broeikasgassen, waarvan CO₂ en water de belangrijkste zijn, verhinderen dat de ontvangen stralingsenergie weer aan de wereldruimte wordt afgegeven, met een – extra – opwarming van de biosfeer als gevolg. De warmteabsorptie van de broeikasgassen is verschillend. Water is voor 36 tot 70 procent verantwoordelijk voor dit 'broeikaseffect', CO₂ voor 9 tot 26 procent [10]. De bijdrage van andere gassen als methaan, ozon en lachgas is veel geringer.



Afbeelding 10. Gemiddelde wereldwijde warmtestromen tussen zon en aarde in de periode april 2000-maart 2004: instraling (links), uitstraling(rechts) en interactie via geleiding (voelbare warmte) en stroming (latente warmte) (midden). Latente warmte die hoog in de atmosfeer wordt afgegeven (roodomrand) ontsnapt uit de broeikas. Naar [11]

Door de eigenschappen van de atmosfeer en de daar verlopende processen, wordt de energie van de zon in de biosfeer verdeeld (afbeelding 10). De dominante processen zijn de instraling (geel, links) en de terugstraling (beige, rechts). In beide processen is tevens sprake van gedeeltelijke reflectie. Verder is directe interactie tussen lucht en water in de vorm van evapotranspiratie (blauw, midden) van bijzonder belang. Dit biofysische proces behelst de actieve opname en verdamping van water door de levende vegetatie op aarde. Daarnaast treedt boven land en vanuit de oceanen fysische verdamping op. In de gevormde waterdamp is zeer veel warmte opgeslagen. Door convectie – vochtige lucht is lichter dan droge – wordt deze voor een aanzienlijk deel tot in de hoogste lagen van de atmosfeer gebracht, waar condensatie optreedt en de warmte wordt afgegeven. 35 tot 40 procent van de stroom latente warmte passeert ongehinderd de barrière van de broeikasgassen. De neerslag die op de aarde terugvalt sluit de atmosferische waterkringloop. De verdamping van vloeibaar water tempert de opwarming van het aardoppervlak en de bovenlaag van de oceaan sterk (vergelijk afbeelding 8). Daardoor is tevens de uitstraling, die bijdraagt aan het broeikas effect, op vochtige en begroeide plekken veel geringer (afbeelding 11).



Afbeelding 11. Het verkoelende effect van vegetatie en water [7]

Warmtebalans

Als de warmtebalans precies in evenwicht is, blijft de temperatuur van de atmosfeer constant. In de periode 2000-2004 is een overschot van gemiddeld $0,9 \text{ W/m}^2$ gemeten [11]. Op grond daarvan voorspelt men een opwarming van minimaal 1 à $2 \text{ }^\circ\text{C}$ per eeuw. Vergeleken met de bruto in- en uitstraling, is dit verschil uiterst klein. Een relatief geringe verandering in een van de andere warmtestromen kan de balans al verder verstoren, of weer in evenwicht brengen. Passende ingrepen in de waterhuishouding bewerkstelligen een verschuiving in de verhouding tussen de stromen latente en voelbare warmte. Daardoor neemt de evapotranspiratie toe en daalt de temperatuur aan het aardoppervlak. Dit mes snijdt dus aan twee kanten.

Het is aannemelijk dat met ingrepen via de watercyclus even effectieve of zelfs effectievere correcties op de wereldwijde warmtebalans kunnen worden gerealiseerd. Als bijkomend voordeel zou zo ook voor nu reeds in de atmosfeer aanwezig kooldioxide kunnen worden gecompenseerd, waarmee de teruggang van de opwarming eerder inzet en/of wordt versneld.

Klimaatmodellen en effectvoorspelling

Om de klimaatprocessen en hun samenhang te begrijpen en voorspellingen te kunnen doen worden wiskundige modellen gebruikt. Deze vereenvoudigen de werkelijkheid. Dat is niet onoverkomelijk, zolang de belangrijkste processen correct worden weergegeven. Op de gangbare modellen is echter veel kritiek, vooral vanwege de relatie tussen water en warmte.

- Van een echt fysisch 'broeikaseffect' in de atmosfeer is geen sprake. Het samenspel van thermodynamische, chemische en geofysische processen in de atmosfeer is ingewikkelder dan deze term suggereert [12].
- De beschrijving van de horizontale en verticale ruimtelijke temperatuurverdeling, die voor de rol van water zo belangrijk is, is ontoereikend [13], [14].
- Er is onvoldoende aandacht voor de watertransport- en uitwisselingsprocessen in in de atmosfeer [15], [16], [17].
- Wolkenprocessen in de atmosfeer zijn niet ontrafeld [18]. Electriche wisselwerking ontbreekt in de benadering geheel [19], [20]. De gemeten snelheid van een deel van de vallende regendruppels kleiner dan 0,5 mm, blijkt echter vele malen hoger dan wat op grond van de versnelling van de zwaartekracht en de luchtweerstand wordt berekend [21], [22]. Gerald Pollack noemt de invloed van electrostatische verschijnselen op de neerslagvorming van cruciale betekenis [23].
- Door de modulaire opbouw met vanuit afzonderlijke disciplines aangeleverde deelmodellen en de - weinig onderbouwde - extrapolatie van historische tijdreeksen, ontbreken (terug)koppelingen tussen de verschillende processen grotendeels.
- Het hedendaagse bodemgebruik – met de daaraan gekoppelde waterhuishouding – is volgens toonaangevende vegetatiedeskundigen een belangrijke oorzaak van de klimaatproblemen.
- Er is geen toetsing en geen gevoeligheidsanalyse voor de verklarende variabelen beschikbaar voor de invloed van CO₂. Daardoor is voorspelling van het effect van beperking van de uitstoot van kooldioxide een hachelijke zaak.

Tegen de achtergrond van deze significante tekortkomingen is er alle reden om naast kooldioxidegerelateerde maatregelen ook andere oplossingsroutes serieus te onderzoeken en te implementeren. De watercyclus biedt tal van technische, ecologische en bestuurlijke aangrijpingspunten.

Conclusies

- Waterdamp en kooldioxide zijn de belangrijkste broeikasgassen. Kooldioxide is uniform over de atmosfeer verdeeld en alleen over zeer lange tijdvakken te beïnvloeden. Het watergehalte fluctueert snel in tijd en plaats; het kan daardoor snel reageren op veranderde omstandigheden.
- Water beïnvloedt de impact van opwarming. Het matigt de temperatuur aan het aardoppervlak door verdamping. Vochtige lucht kan tot grote hoogten opstijgen, waar het water condenseert of bevriest. De meegevoerde latente warmte die in de stratosfeer wordt afgegeven passeert de broeikaslaag ongehinderd.
- In de gangbare klimaatmodellen zijn de watergerelateerde interacties onderbelicht en niet voldoende kwantitatief gekoppeld. Wederzijdse beïnvloeding komt daardoor niet altijd in beeld. Daarnaast behoeft de invloed van atmosferische electriciteit op het gedrag van water meer aandacht.
- Er is alle reden om het hedendaagse bodemgebruik – met de daaraan gekoppelde waterhuishouding – als een belangrijke oorzaak van de klimaatproblemen te beschouwen.
- Water is een integrerende factor van de klimaatverschijnselen en daarmee de sleutel tot systemisch uitgebalanceerde maatregelen. Vergroting van de evapotranspiratie is potentieel een veel krachtiger en directer stuurmiddel dan een aan kooldioxide gerelateerde klimaatstrategie. In een eventuele volgende bijdrage in deze reeks zal nader op concrete mogelijkheden worden ingegaan.

Referenties

1. Chaplin, M. (2000). *Anomalous properties of water*.
https://web.archive.org/web/20200804031144/http://www1.lsbu.ac.uk/water/phase_anomalies.html.
2. Trinchler, K. (1981). 'The mathematical-thermodynamic analysis of the anomalies of water and the temperature range of life'. *Water Research* **15**: p. 443-448.
3. https://nl.wikipedia.org/wiki/Opwarming_van_de_Aarde.
4. Wanink, J., et al. (2008). 'Invloed van klimaatverandering op fytoplankton van de Friese meren'. *H2O* **41** (23): p. 32-35.
5. <https://nl.wikipedia.org/wiki/Zeespiegelstijging>.
6. Kravčík, M., Pokorný, J., et al. (2008). *Water for the Recovery of the Climate*. Kosice: NGO People and Water.
7. Ellison, D. et al. (2017), 'Trees, forests and water: Cool insights for a hot world'. *Global Environmental Change* **43**: p. 51–61.
8. Gast, M.K.H., Sluis J.W. van (2017). 'Water en klimaat', in *Studiemiddag Water en Klimaat*. Stichting Water Drager van Leven/Waternet: Amsterdam, 24 maart 2017.
9. Masson-Delmotte, V. et al. (2021), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC: Cambridge University Press. In Press. 150 pp.
10. <https://nl.wikipedia.org/wiki/Broeikaseffect>.
11. Trenberth, K.E., Fasullo, J.T. and Kehl, J. (2009). *Earth's global energy budget*. BAMS, 2009 (March): p. 1-13.

12. Ward, P.L. (2015). *The Thermodynamics of Climate Change in Rocky Mountain Section - 67th Annual Meeting (21-23 May)*. US Geological Survey, Teton Tectonics, Jackson, WY
13. Bakker, A. (2015). *The Robustness of the Climate Modelling Paradigm*. Proefschrift Vrije Universiteit Amsterdam, 196 pp.
14. Kalisch, M. (2020). *Die fundamentalen Denkfehler im Treibhausmodell. Kernpunkte* **3**(16): p. 9-12.
15. Immerzeel, W. (2021). *Wasser aus den Bergen*. Spektrum der Wissenschaft.
16. Benedict, I. (2021). 'Vaker extreme neerslag door atmosferische rivieren'. *H2O-actueel*, 4 mei 2021).
17. Sonnemans, J. (2021). *Linking Atmospheric Rivers, extreme precipitation and river discharge in the Rhine catchment*. Masterscriptie Wageningen: WUR, 26 pp.
18. Inoue, J. et al. (2021). 'Oceanic Supply of Ice-Nucleating Particles and Its Effect on Ice Cloud Formation: A Case Study in the Arctic Ocean During a Cold-Air Outbreak in Early Winter.' *Geophysical Research Letters* **48**(16): p. e2021GL094646.
19. Tóth, J.R. et al. (2020). 'Electrostatic forces alter particle size distributions in atmospheric dust'. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**: p. 3181-3190.
20. Hunting, E. et al. (2021). 'Challenges in coupling atmospheric electricity with biological systems'. *International Journal of Biometeorology*, **65**: p. 45-58.
21. Montero-Martinez, G. et al. (2009). 'Do all raindrops fall at terminal speed?' *Geophysical Research Letters*, **36**(11): p. L11818 1-4.
22. Larsen, M.L., Kostinski, A.B. and Jameson, A.R. (2014). 'Further evidence for superterminal raindrops'. *Geophysical Research Letters*, **41**(19): p. 6914-6918.
23. Pollack, G. (2017). Weather and EZ Water — An Intimate Role of Separated Charge | EU2017', in *EU-2017 future science Conference*. Phoenix: The Thunderbolts Project.