


Leren van klimaatverandering

Klimaatverandering is een uitermate belangrijk maar zeer complex vraagstuk. Met grote onzekerheden over de onderliggende, gekoppelde processen – fysisch, ecologisch, socio-economisch – en de effecten van de opwarming. Laat dit daarom het leidende thema zijn van het aardrijkskundecurriculum. Leerlingen zullen daarbij aspecten van bijna alle andere vakken tegenkomen en gaan integreren.

De grootste ijskap ter wereld, die op Groenland, smelt zo hard dat herstel zelfs in koude jaren moeilijk is. Op de foto: Oost-Groenland in de zomer, onderweg tussen Kulusuk en Tasillaq. FOTO: MARIUSZ KLUZNAK/FLICKR 

Wilco Hazeleger

Klimaatverandering is een van de grootste maatschappelijke thema's van de 21e eeuw. We voelen de verandering nu ook aan den lijve in onze eigen achtertuin. Van rampspoed door overstromingen tot klein leed van het gebrek aan schaatswinters. Politici en beleidsmakers maken wereldwijd afspraken om emissies van broeikasgassen te verminderen, activisten lijmen zich vast en roepen om meer actie en we zitten vol in een energietransitie. Omdat klimaatverandering zo'n belangrijk thema is dat ons allemaal raakt, heeft het vanzelfsprekend een centrale plek in een modern aardrijkskundecurriculum.

Systeemperspectief

Klimaatverandering als onderzoeksthema heeft een natuurwetenschappelijke oorsprong. Door de grote impact is het ook maatschappelijk van enorm belang geworden. Een klimaat specialist was twintig jaar geleden nog iemand die alles van de atmosfeer, oceanen en ijs wist, zoals ik zelf. Ondertussen kan het ook een specialist zijn die gedrag van mensen bestudeert, financiële instituties analyseert, of aanpassingen in steden ontwerpt, of iemand die alles van de energietransitie weet. De menselijke invloed op klimaat begint bij de verandering van landgebruik en het gebruik van grondstoffen. Daarmee is klimaatverandering ook vanuit historisch perspectief relevant, en gaat deze samen met discussies over de verdeling van welvaart. We zien klimaatverandering ook terug in de kunsten. Het is dus een enorm breed begrip. Om daar greep op te krijgen, is een systeemperspectief waardevol. In een systeem bepalen karakteristieken van subsystemen en interacties

tussen subsystemen op verschillende tijd- en ruimteschalen het gedrag van het geheel. Het gaat erom niet alleen de delen van een systeem in detail te begrijpen, maar ook het hele systeem in ogenschouw te nemen. Een systeem perspectief is vaak een holistisch perspectief zoals dat in de ecologie gebruikt wordt. Het kent ook aspecten van een reductionistisch perspectief [waarbij de complexe werkelijkheid uiteen te rafelen is tot de kleinste bouwstenen, *red.*], dat in de fysica gemeengoed is. In het aardrijkskundecurriculum is het waardevol beide perspectieven te leren herkennen en te kunnen verbinden. Klimaatverandering is daar het perfecte thema voor.

Brug tussen disciplines

Aardrijkskunde vormt een brug tussen disciplines en hun epistemologische wortels. Die brug is relevant om de grote maatschappelijke thema's van onze tijd te begrijpen. Dat geldt ook voor klimaatverandering. De vaardigheden om disciplineaire kennis te kunnen verbinden, stellen ons in staat verleden en huidige klimaatverandering te duiden en mogelijke toekomstige klimaten te verkennen. Ik voel me hier uitgedaagd om vanuit mijn expertise onderdelen van het klimaatstelsel en interacties tussen onderdelen te beschrijven. Ik zal tegen de grenzen lopen van de klassieke systeembeschrijvingen en tegen grenzen van de empirie om die beschrijvingen te valideren. Dat vraagt nieuwe methodes om klimaatverandering te beschouwen.

Klimaatstelsel uit balans

Ook het klimaat is een systeem waar interacties tussen onderdelen de ontwikkeling van het geheel bepalen. Dat gebeurt op allerlei ruimte- en tijdschalen. Op de grootste schaal, die van de planeet Aarde, wordt klimaat bepaald door de uitwisseling van energie. De energie die de planeet ontvangt van de zon, is ongeveer in balans met de reflectie en uitstraling van energie. Variaties in zonnestraling door verandering in de baan van de aarde of de sterkte van de zon bepalen het aardse klimaat, net als variaties in reflectie van de planeet en langgolvlige terugstraling.

In de atmosfeer vinden er veel interacties plaats die het regionale klimaat bepalen. Dit systeem kan beschreven worden in mondiale en regionale budgetten, en cycli van grootheden die de interacties beschrijven. Die cycli worden vormgegeven door een complex van natuurlijke en sociale processen. Zo wordt het holistische systeem perspectief verbonden met het reductionistische procesperspectief. De watercyclus en de koolstofcyclus zijn de belangrijkste cycli in het klimaatstelsel. We kunnen ze vanuit natuurlijke processen beschouwen. Zo circuleert water vlot in de atmosfeer en oceaan, en heel langzaam in ijsmassa's en grondwater. Interacties tussen subsystemen in de vorm van verdamping, smelt, condensatie en neerslag bepalen de budgetten van water in de subsystemen. Menselijke activiteiten hebben invloed op de watercyclus. Bijvoorbeeld heel direct via irrigatie en stuwdammen en indirect doordat uitstoot van broeikasgassen de atmosferische circulatie en interactie van water tussen subsystemen verandert. Voor de koolstofcyclus is het vergelijkbaar. Koolstof ligt vastgelegd in gesteentes, bodem en vegetatie en er zijn natuurlijke interacties tussen land, oceaan en atmosfeer op allerlei tijdschalen. De mens verstoort die cyclus door verbranding van vastgelegd koolstof. Kennis van verstoringen van deze cycli door de mens tegen de achtergrond van natuurlijke veranderingen is essentieel om te begrijpen hoe en waarom het klimaat verandert. Hoewel het niet mijn expertise is, kan hetzelfde over sociale systemen worden gezegd. Essentieel is dat het systeem niet in balans is. Het klimaat verandert continu. Het wordt uit balans gebracht door natuurlijke processen, zoals variaties in de baan om de zon, vulkaanuitbarstingen en interacties tussen land, oceaan en ijs. Daarmee kunnen we veel klimaatvariaties op geologische tijdschalen tot aan de seizoenen duiden. Het klimaat raakt ook uit balans door menselijke activiteiten, waarbij veranderingen van landgebruik en uitstoot van broeikasgassen en stofdeeltjes het belangrijkste zijn. Daarmee kunnen we ook de huidige opwarming duiden.

Een klimaat specialist was twintig jaar geleden nog iemand die alles van de atmosfeer, oceanen en ijs wist. Ondertussen kan het ook een specialist zijn die gedrag van mensen bestudeert, financiële instituties analyseert, of aanpassingen in steden ontwerpt, of iemand die alles van de energietransitie weet

Forceringen en terugkoppelingen

Een natuurwetenschappelijke manier om veranderingen in het klimaatstelsel te kwantificeren, is het vereenvoudigen tot een systeem waarvan het gedrag, ofwel de 'respons', bepaald wordt door *forceringen* en *terugkoppelingen*. Het eenvoudigste model om de ontwikkeling van de temperatuur op aarde te berekenen, bestaat uit de respons op de som van alle externe forceringen en de terugkoppelingen in het klimaatstelsel.

Met *forcering* bedoel ik hier de verandering van de straling die de planeet ontvangt. Dat kan door variaties in de zon of in de positie van de aarde ten opzichte van de zon. Het kan ook het gevolg zijn van verandering in samenstelling van de atmosfeer, zoals stofdeeltjes uit vulkaanuitbarstingen, emissies van broeikasgassen en verandering van landgebruik. Alleen al door deze forceringen te beschouwen zien we hoe moeilijk het is om natuurlijke van menselijke factoren te onderscheiden. Ze doen allemaal mee.

De respons wordt ook bepaald door *terugkoppelingen* in het systeem. Een belangrijke positieve terugkoppeling is de verandering van straling door waterdamp. Opwarming door extra uitstoot van koolstofdioxide, de forcering, geeft meer waterdamp in de atmosfeer. Omdat waterdamp zelf een broeikasgas is, warmt de aarde nog verder op. Een voorbeeld van een negatieve terugkoppeling is de uitstraling van de aardse atmosfeer naar de ruimte. Die uitstraling is hoger

naarmate de temperatuur hoger is, en dat is een negatieve terugkoppeling. Zulke terugkoppelingen zijn ruimtelijk verdeeld. Een zeer bekende regionale terugkoppeling is het ijs-albedo-effect. Afname van zee-ijs in het poolgebied geeft minder reflectie van de zonnestraling en daarmee extra opwarming.

Ook het effect van cycli in het klimaat is hiermee te beschrijven. Zo wordt een deel van de uitgestoten koolstofdioxide opgenomen in de oceanen en het landoppervlak (negatieve terugkoppeling), maar kan opwarming ook leiden tot het ontdooien van permafrost, vrijkomen van methaan uit de bodem en opwarming (positieve terugkoppeling). Als positieve terugkoppelingen overheersen kan het tot een kantelpunt leiden, waar het klimaat snel naar een ander evenwicht gaat. Kantelpunten (*tipping points*) zijn een begrip dat afkomstig is uit de systeem- en complexiteitstheorie en bij uitstek past bij een systeembeschrijving van klimaat. Een systeembeschrijving van respons op forceringen en terugkoppelingen is niet alleen wetenschappelijk relevant. Het vormt de basis van veel klimaatbeleid. Met deze beschrijving bepalen onderzoekers *klimaatgevoeligheid*: de respons van temperatuur op een bepaalde verandering in broeikasgasconcentraties. Deze grootheid, die niet heel goed bekend is, bepaalt welke emissiedoelstellingen gehaald moeten worden om bijvoorbeeld de 1,5 graad doelstelling van het bekende Parijsakkoord te halen. Elk broeikasgas

draagt bij aan de forcering. En terugrekenend kan bepaald worden welk budget er voor elk land nog over is om binnen de doelstelling, de respons, te blijven. En dat bepaalt in grote mate veel andere beleidsterreinen.

Verhaallijnen en scenario's

Er zitten grenzen aan deze systeembenadering. Het klimaat is dermate complex dat niet alle relevante processen goed bekend zijn. Dat geldt voor het fysische klimaat, maar omdat klimaat niet alleen over fysica gaat, ook voor de effecten van de opwarming. Vaak is die impact samengesteld. De combinatie van effecten versterkt het klimaatprobleem. Daar komt bij dat de effecten van klimaatverandering het sterkst zijn bij extremen (hittes, overstromingen enzovoorts). Maar extremen zijn zeldzaam, waardoor er per definitie weinig empirische data en daarmee kennis voorhanden zijn. Extremen zijn daardoor niet goed begrepen en statistisch lastig te beschrijven. Dit geldt helemaal voor zogeheten *black swan*-gebeurtenissen [die niemand van tevoren heeft zien aankomen of voorspeld, en die wetenschappelijke modellen onderuithalen, *red.*]. Vertaald naar klimaatverandering: we hebben een toekomstig klimaateffect misschien nog helemaal niet gezien. De empirie laat ons in de steek en we kunnen ons niet langer door het verleden laten leiden als het gaat over de toekomst. Bekende methodes van hypothetiseren, modelleren, voorspellen en valideren schieten tekort.

Dit soort diepe onzekerheden en *wicked problems* vragen om een andere benadering dan mathematische beschrijvingen van systemen. Het gekoppelde fysisch-ecologisch-socio-economische klimaatsysteem is dermate complex dat dit nodig is. Er zijn verschillende methodes om verder te komen. Vaak wordt gebruik gemaakt van scenario's en verhaallijnen. Vooral de onvoorspelbare socio-economische toekomst domineert de spreiding van mogelijke toekomstige klimaatverandering. Op basis van relevante mogelijke ontwikkelingen in de wereld, zoals globalisering of juist regionale rivaliteiten, verduurzaming of verdere uitputting van fossiele bronnen, marktwerking of regulering, worden plausibele en consistente ontwikkelingen van allerlei relevante klimaatparameters in kaart gebracht. Dat varieert van ontwikkeling van industrie en landgebruik, tot bevolkingsgroei en handel. Dat hele verhaal levert consistente toekomstige veranderingen in klimaat, broeikasgassen en andere ontwikkelingen op. Dergelijke verhaallijnen noemen we *shared socioeconomic pathways*. Bij grote klimaatakkoorden zoals die van Parijs wordt op basis van dergelijke verhaallijnen en schattingen van klimaatgevoeligheid bepaald hoeveel uitstoot in de toekomst wordt voorzien om een bepaalde mate van opwarming niet te overschrijden. Ook rond aanpassing aan klimaatverandering worden verhaallijnen en scenario's gebruikt. De impact van zeespiegelstijging op de Nederlandse delta is daar een voorbeeld van.

Onzekerheden over mondiale ontwikkelingen zoals globalisering of juist regionale rivaliteiten, verduurzaming of verdere uitputting van fossiele bronnen, marktwerking of regulering, nopen tot nieuwe benaderingen in de vorm van klimaatscenario's en verhaallijnen

Deze grijpt op zo veel plaatsen in en brengt zo veel keuzes met zich mee dat er verschillende toekomsten mogelijk zijn. Van meebewegen met de zeespiegel tot verkorting van de kustlijn met dijken en dammen. De verhaallijnen maken ook de *normatieve* aspecten van klimaatverandering duidelijk. Er liggen vaak keuzes ten grondslag aan het beleid van adaptatie aan en mitigatie van klimaatverandering. Die keuzes hebben een normatief karakter en het is belangrijk daar zicht op te hebben om beleidskeuzes te onderbouwen.

Leidend thema bij aardrijkskunde

Klimaatverandering is enorm belangrijk, maar ook complex. Wat zouden aardrijkskundeleerlingen moeten weten over het klimaat? Ze moeten kunnen beschrijven, interpreteren en uitleggen wat er empirisch wordt waargenomen en wat een toekomstig klimaat mogelijk kan brengen. Ze moeten dit kunnen doen door relevante natuurlijke en sociale processen en interacties daartussen te herkennen en te beschrijven. Het is waardevol dat systemisch te beschouwen: niet alleen natuurwetenschappelijk, zoals ik hier gedaan heb, maar ook vanuit andere disciplines. Dat betekent dat leerlingen aspecten van bijna alle andere vakken gaan tegenkomen en die gaan integreren. Ten slotte, ik ben opgegroeid met het archaische Köppen-systeem in mijn aardrijkskundeboeken. Ik ben het in mijn hele carrière als klimaatwetenschapper nooit meer tegengekomen. Ik wens de leerlingen een vernieuwend curriculum toe dat aansluit bij de maatschappelijke ontwikkelingen. Het is mooi te zien dat aardrijkskunde in principe een van de meest moderne vakken in het curriculum is, waar interdisciplinariteit ingebakken is. Klimaatverandering kan in dat curriculum het leidende thema zijn. •

Wilco Hazeleger is hoogleraar Climate System Science en decaan aan de Faculteit Geowetenschappen van de Universiteit Utrecht.