

Het dak van de wereld wacht op mij tot ik er ben  
Tot ik ontdekt heb dat het is verdwenen  
Ik kan verder dan ik denk  
Ik geef me over, ik leg me neer

Ik ben vrij  
Met mijn voeten op de grond en mijn handen bij de zon  
Ik ben vrij  
Er is geen hemel en geen hel, het is de oorzaak van zichzelf

Mijn armen wijd, ik wil erbij zijn als ik leef  
Laat mij een mens zijn die niets zoekt  
Omdat-ie niets meer nodig heeft  
Ik geef me over, ik leg me neer

Ik ben vrij  
Met mijn voeten op de grond en mijn handen bij de zon  
Ik ben vrij  
Er is geen hemel en geen hel, het is de oorzaak van zichzelf

Je kijkt omhoog en je ziet hoe ver het is, en toch dichtbij  
Je zoekt naar de bril waar je door kijkt, het is dichtbij  
Je bent vrij

**'Vrij'** van *Bløf*





*De Buys Ballot leerstoel is ingesteld door  
de Stichting Waterloopkundig Laboratorium met medewerking  
van KNMI en RIKZ.*





---


**Samenvatting.** Het klimaat beïnvloedt de staat van het land. Ook in de meteorologie beïnvloeden atmosferische klimaatprocessen de toestand van het land: neerslag, wind, luchtvochtigheid, ze zijn van invloed op hoe nat het land is, of hoe warm, of bevroren. Maar andersom heeft het land ook een duidelijke invloed op de atmosfeer: water, straling, en warmte vinden ook hun weg naar boven. Bij een dergelijke tweezijdige beïnvloeding spreekt men van terugkoppeling, of feedback. En die feedback is er deels verantwoordelijk voor dat bijvoorbeeld droge perioden in de zomer lang aan kunnen houden. Maar begrijpen we wel goed hoe het werkt? Weten we wel hoe we die terugkoppelingen in een klimaatmodel moeten stoppen? Zijn projecties met die klimaatmodellen voor ons toekomstig klimaat wel betrouwbaar? En hoe moeten we naar deze terugkoppeling kijken in het wetenschappelijk klimaatonderzoek? De oratie gaat in op deze vragen.






---

**‘Er is meer’** zou de ondertitel kunnen zijn van een oratie die *‘Interactie tussen hemel en aarde’* heet. Er is zeker meer tussen hemel en aarde. Afgezien van kosmische, spirituele en godsdienstige krachten leven wijzelf letterlijk onder de hemel en op de aarde, er tussenin dus. Er zijn talloze kanten aan het leven en de manier waarop dat tot stand gekomen is waarover je je als gewone sterveling kunt verbazen. We leven op een planeet die (gelukkig) een ozonlaag heeft om ons tegen schadelijke UV te beschermen, (gelukkig) in een baan om de zon vliegt en draait waardoor we netjes overal op aarde de beschikking hebben over zonne-energie, (gelukkig) beschikt over een plantenpopulatie die die energie via fotosynthese vastlegt in verbrandbaar koolstofhoudende materie, (gelukkig) een atmosfeer heeft waar zuurstof in zit waarmee die energie weer kan worden aangesproken, (gelukkig) nog wat extra broeikasgassen heeft waardoor de temperatuur aan het aardoppervlak het voorkomen van vloeibaar, gasvormig en bevroren water mogelijk maakt, en (gelukkig) wat chemische componenten heeft verzameld die de bouwstenen van leven hebben gevormd.



---

**Waar we ook mazzel mee hebben** is de grond waarop we leven. Dat is op vele plaatsen geen solide plaat rots maar een poreus stelsel waarin wortels kunnen groeien, zuurstof kan doordringen voor de noodzakelijke biologische processen, en, last but not least, waarin water kan worden opgeslagen voor tijden waarin het niet gratis en voor niks uit de lucht komt vallen. Nu lijkt dat wellicht voor een land als Nederland – waar het volgens sommigen altijd lijkt te regenen – een overbodige luxe, maar niks is minder waar. De relatieve tijd dat het regent hangt natuurlijk af van de gebruikte tijdseenheid: uitgedrukt in jaren regent het 100% van de tijd (er is nooit een volledig droog jaar), in dagen ongeveer 25 tot 30% en in uren is dat ongeveer 7 tot 8%. De verdamping die er in de overige 92-93% van de uren plaats kan vinden wordt gevoed met water wat ergens is opgeslagen. Voor een deel direct



op het oppervlak, als bladnat of in plassen, maar het grootste deel komt uit de grond, via kale grond verdamping of transpiratie door planten.

---

**En die transpiratie** is nog zo'n proces waarbij we van geluk mogen spreken dat het bestaat. Je kunt stellen dat die transpiratie alleen maar een onhandige verliespost is voor planten. Bladeren hebben nou eenmaal openingetjes (genaamd huidmondjes) om kooldioxide binnen te laten die nodig is voor de fotosynthese, en die openingen leiden tegelijk tot een verlies aan water. Maar transpiratie is meer dan een verliespost. Vergeet niet dat dat water in de plant een belangrijk transportmiddel is om nutriënten uit de bodem naar boven te transporteren. De transpiratie zorgt ervoor dat de bladeren niet te warm worden in de zon, net als het effect van zweten van de menselijke huid. En de waterdruk zorgt voor stevigheid in de plant, zeker de delen die niet door hout zijn versterkt. We moeten de korrelige bodem dus dankbaar zijn dat ze dat water op kan slaan, maar moeten er tevens vanuit gaan dat ook de bodemwatervoorraad eindig is, en dat ook planten zinnig om dienen te springen met die beperkte watervoorraden.

---

**Dat doen planten in de regel** door actief de openingstoestand van die bladopeningen te reguleren. Een ingenieus systeem zorgt ervoor dat zodra de waterdruk in de cellen die naast die openingen liggen afneemt de cellen slap worden en de openingen vanzelf wat kleiner worden. Uiteindelijk zullen ze helemaal sluiten als de verdampingscondities te ongunstig zijn en tot te grote verliezen zouden leiden. Die openingstoestand is sterk afhankelijk van omgevingsfactoren. Licht leidt tot een opening van de huidmondjes zodat de fotosynthese kan plaatsvinden. Het hormoon abscisinezuur signaleert dreigende droogte in de wortels en doet de huidmondjes sluiten. Ook een te grote vraag naar water door een lage luchtvochtigheid laat de openingstoestand afnemen.



Hiermee vormt vegetatie dus een biologisch actieve schakel in de hydrologische cyclus tussen neerslag, bodemvocht en verdamping. Het zorgt voor een negatieve terugkoppeling: het waterverlies door transpiratie wordt vanzelf verminderd als de bron van dat water (bodemvocht) opdroogt.

---

**Maar, er is meer** tussen hemel en aarde. De atmosfeer speelt ook een rol. Die neemt het verdampte water immers op en zorgt daarmee op korte tijdschalen ook voor een negatieve terugkoppeling: zodra de lucht verzadigd is met water zullen de planten het water niet kwijt kunnen en zal de transpiratie vanzelf verminderen. Maar omdat de enige waterbronnen van betekenis zich nabij het aardoppervlak bevinden is de lucht onderin gemiddeld vochtiger dan bovenin. Hierdoor ontstaat een verticale vochtgradiënt die het water netto naar boven doet afvoeren, weg van het oppervlak. Dat kan uiteraard niet eeuwig zo doorgaan: dat water moet er op een gegeven moment ook weer uit. Dat proces kennen we maar al te goed: neerslag. Ondertussen is er trouwens met dat water heel wat meer getransporteerd dan alleen H<sub>2</sub>O-moleculen. De verdamping aan het oppervlak kost immers energie, en die energie komt weer vrij als het water in de atmosfeer condenseert en als neerslagdruppels verdwijnt. Daarmee zorgt de hydrologische cyclus dus ook voor een aanzienlijk energietransport. Bijna 80% van de wereldgemiddelde netto stralingsenergie aan het oppervlak wordt via water aan de atmosfeer overgedragen, de rest is de directe voelbare warmte.

---

**We hebben hier een schets gemaakt** van een deel van de hydrologische en energetische cycli in ons klimaatstelsel, en op een paar plekken het woord ‘terugkoppeling’ laten vallen. Negatieve terugkoppelingen, wel te verstaan, waarin het onderliggende proces zichzelf dus doet afnemen. In interpersoonlijke relaties associëren we negatieve terugkoppeling of feedback met het leveren



van kritiek, en positieve feedback staat gelijk aan complimentjes geven. Toch is ook hier terugkoppeling bedoeld om een proces zichzelf te laten bijsturen. Het geven van complimenten moedigt de ontvanger aan om meer van hetzelfde gedrag te vertonen, in de hoop wellicht meer complimenten te krijgen. Ook terugkoppelingen in het klimaatsysteem zorgen voor een verzwakking of een versterking van het proces wat de terugkoppeling voedt. In de interactie tussen twee componenten (land, atmosfeer) doet het grappige fenomeen zich voor dat ze beiden een negatieve terugkoppeling laten zien, maar de combinatie wel degelijk tot een positieve terugkoppeling kan leiden, waarin het onderliggende proces zichzelf dus versterkt. Zo zie je in extreem droge zomers in Europa dat watertekorten in de bodem op een gegeven moment de verdamping reduceren, en die leiden dan weer tot een verminderde hoeveelheid vocht in de atmosfeer en een vermindering van de neerslag, die de bodemdroogte verder versterkt. Zo'n positieve terugkoppeling werkt stabiliserend, en zorgt ervoor dat een droge periode soms weken achtereen kan aanhouden, totdat een sterke aanvoer van water van elders (van de Atlantische Oceaan bijvoorbeeld) de droge cyclus doorbreekt en de bodemvochtvoorraden weer aanvult.


---

**Ook in andere streken van de wereld** heeft een positieve terugkoppeling tussen land en atmosfeer invloed op de grootschalige weerkundige verschijnselen. Een moesson-klimaat kenmerkt zich door een atmosferische circulatie die samenhangt met het temperatuurverschil tussen land en oceaan. Zodra het land warmer wordt dan de nabijgelegen oceaan ontstaat een stijgende luchtbeweging boven land die horizontaal wordt aangevuld met vochtige oceaanlucht die uiteindelijk de regens brengt. Omdat dit land-oceaan temperatuurverschil samenhangt met de positie van de zon vertoont de moesson een regelmatige jaarlijkse cyclus. Er zijn echter sterke aanwijzingen dat de aanvang van het moes-

son-seizoen, maar ook de afstand waarmee de moesson landinwaarts trekt, mede bepaald wordt door land-atmosfeer interactie. Dichtbij de kust is de neerslag vooral afkomstig van water wat uit de oceaan is verdampt. Verder landinwaarts is echter een steeds groter deel van het water afkomstig van verdamping van het landoppervlak, die weer gevoed wordt door de regen die daarvoor viel. Deze lokale terugkoppeling zorgt er dus voor dat de neerslag-systemen als het ware een extra duwtje landinwaarts krijgen.

---

**De droge Europese zomers** van o.a. 2003 en 2006 laten zien dat we niet op alle fronten even goed om kunnen gaan met langdurige relatief abnormale omstandigheden. De effecten op het aantal sterfgevallen, de scheepvaart, de veendijken en de elektriciteitsvoorziening zijn al vaak genoemd. Maar ik kan het niet nalaten om te wijzen op een heel wat grotere kwetsbaarheid voor abnormale weersomstandigheden in bijvoorbeeld West-Afrika, waar de seizoenregens een kwestie van leven en dood zijn. Een goede voorspelling van de timing van het moesson-seizoen is cruciaal. Zeker een valse start (een moesson die begint met een paar natte dagen gevolgd door een langere periode met droogte voordat de echte regens beginnen) heeft grote gevolgen wanneer het zaaigoed in de landbouw niet goed opkomt door droogte. De slechte voorspelbaarheid van dat moesson-gedrag werkt direct door in de economische vitaliteit van zo'n gebied: om te voorkomen dat alles in één keer verloren gaat bij een foutieve voorspelling wordt er vaak zaaigoed achter de hand gehouden en worden dus niet alle beschikbare bronnen optimaal ingezet. In deze leven-of-dood strategie wordt dus heel anders met risico's omgegaan dan we kennen uit het Nederlandse beleid om ons voor te bereiden op klimaatverandering. Er wordt in het Afrikaanse voorbeeld bewust aangestuurd op een (economisch gezien) suboptimale strategie, terwijl het meeste rekenwerk in Nederland juist economisch maximaal profijt nastreeft.



---

**Het Nederlandse klimaatrekenwerk** wordt – zoals algemeen bekend – onder andere verricht met complexe computermodellen van het klimaatsysteem. Deze modellen zijn opgebouwd uit een groot aantal componenten die uitrekenen hoe de toestand van de atmosfeer, de bodem, de oceaan en ijsmassa's verandert in de tijd door de uitwisseling van energie, water, impuls en andere materie zoals koolstof. Met deze modellen worden scenario's doorgerekend die aangeven wat er zoal zal veranderen als de wereldgemiddelde temperatuur in 2050 met bijvoorbeeld 1 of 2 graden stijgt ten gevolge van een versterkt broeikas effect. Zo'n gemiddelde temperatuurstijging lijkt niet direct alarmerend, wanneer je je die voorstelt door elke dag 2 graden op te tellen bij de temperatuur die er dan heerst. Maar zo werkt het natuurlijk niet. In een warmer klimaat zullen vele processen anders gaan verlopen, ook de terugkoppelingsprocessen die bijvoorbeeld een rol spelen bij het voorkomen van extreme zomerdroogte in Europa.

---

**Volgens veel** van deze modellen neemt de kans op hoge zomertemperaturen in onze regio aanzienlijk toe<sup>1</sup>. Een zomer zoals we die in Centraal Europa in 2003 hebben beleefd komt volgens sommige berekeningen rond 2050 gemiddeld om het jaar voor. Deze projecties geven aanleiding om op grote schaal na te denken over mogelijke manieren om ons aan te passen aan dit soort toekomstige omstandigheden. Misschien moeten we rivieren wel voorzien van extra stuwdammen om ze bevaarbaar te houden. Misschien moeten we grotere spaarbekkens aanleggen, of een 2<sup>e</sup> IJsselmeer, om de watervoorziening voor drinkwater en irrigatie veilig te stellen. Misschien moeten alle energiecentrales en andere industrieën die koelwater nodig hebben aan de kust worden gebouwd. Misschien moeten we de bollenteelt verplaatsen naar regio's waar een toenemende kwel van zout water door verminderde tgendruk van zoet water niet tot problemen leidt.


<sup>1</sup>Stott, P.A., D.A. Stone and M.R. Allen (2004): Human contribution to the European heatwave of 2003; Nature **432**, 610-613


---

**Afgelopen vrijdag (6 juli)** heeft het Nederlandse kabinet een positief besluit genomen over een nieuwe investering van 50 miljoen euro in onderzoek naar de manier waarop Nederland zichzelf klimaatbestendiger zou kunnen maken. In dat investeringspakket is ook ruimte gemaakt voor een beter begrip van ons klimaatsysteem, met name van de omstandigheden waaronder extreme condities kunnen optreden. Dit onderzoek leidt uiteindelijk tot een betere onderbouwing van de klimaatscenario's die als uitgangspunt dienen voor veel toekomstverkenningen. Die onderbouwing is nodig. Niemand is gebaat bij sombere doemscenario's die eerder op angst dan op een grondige kennis van ons systeem lijken te zijn gebaseerd. En anderzijds moeten we onze koppen natuurlijk niet in het zand steken en er niet van uitgaan dat er tussen hemel en aarde niks mis kan gaan. Klimaatonderzoekers balanceren voortdurend op de rand van dit delicate evenwicht. Daarbij is mijns inziens een nuchtere wetenschappelijke analyse van het klimaatsysteem onmisbaar. Ik vind het dan ook logisch en terecht dat ook in deze nieuwe onderzoeksinvestering ruimte is voor verbetering van modellen en scenario's, en dat er enige weerstand wordt geboden aan het paradigma dat 'we zo langzamerhand wel weten wat er op ons afkomt'.

---

**Ik heb geen systematische analyse gemaakt** van de onderwerpen van de talloze wetenschappelijke publicaties over klimaatmodellen, maar het zou me niks verbazen als er meer geschreven wordt over de tekortkomingen van de modellen dan over de uiteindelijke projecties die er mee worden gemaakt. Het is niet gemakkelijk om een realistisch klimaatmodel te bouwen. Bij fenomenen waarin land-atmosfeer interactie een belangrijke rol speelt – zoals bij de droge zomers of West-Afrikaanse moesson – is het belangrijk dat de componenten van die klimaatmodellen die invloed hebben op die interactie – het land model, het atmosferisch vochttransport, de neerslagvorming – een juiste





beschrijving van de relevante processen geven. Hiervoor vinden al lange tijd zeer waardevolle gecoördineerde experimenten plaats waarin modelcomponenten worden vergeleken met waarnemingen en met elkaar. In veel gevallen leidt dit soort experimenten tot een bijstelling en verbetering van die componenten.

---

**Maar dat is maar een deel** van het verhaal. In de klimaatmodellen moet eigenlijk de hele interactie tussen hemel en aarde goed in elkaar zitten. Ook de terugkoppelingen moeten realistisch zijn. En dat is een stuk lastiger te realiseren. Niet alleen omdat dit betekent dat je losse componenten niet langer apart kunt beoordelen. Niet alleen omdat het moeilijk is om waarnemingen te doen of te bewerken die de sterkte van de terugkoppeling weergeven. Maar ook omdat het in de aard van het beestje zit dat situaties zichzelf via een positieve terugkoppeling als het ware op slot kunnen gooien. Een model wat de werkelijkheid in beginsel heel goed beschrijft kan door een hele kleine verstoring ergens in het systeem enorm van de opgetreden weersituatie af gaan wijken omdat het zijn eigen omstandigheden creëert die hem wegdrijft van de werkelijkheid. Is zo'n model dan verkeerd? Dat kun je niet beoordelen door simpelweg een tijdserie van de waarnemingen naast die van het model te leggen. Je zult op zoek moeten gaan naar de mate waarin in een vergelijkbare situatie een externe kracht in staat zal zijn om de positieve terugkoppelingen al dan niet te verbreken.

---

**Er zijn heel slimme** experimenten gedaan om de modelverschillen en -overeenkomsten in de sterkte van de terugkoppeling tussen land en atmosfeer bloot te leggen<sup>2</sup>. Je kunt uitrekenen wat er bijvoorbeeld verandert aan de variabiliteit van neerslag als je de land-atmosfeer interactie weg zou nemen. Wanneer je een stuk of 10 klimaatmodellen middelt komt daar een patroon uit wat redelijkerwijs te begrijpen is. Maar de verschillen tussen de

<sup>2</sup> Koster, R.D. and co-authors (2004): Regions of Strong Coupling Between Soil Moisture and Precipitation; Science **305**, 1138-1140

modellen onderling zijn groot. Er zijn modellen die bijvoorbeeld in West-Afrika nauwelijks een effect laten zien van land-atmosfeer interactie. Als die modellen gelijk zouden hebben kun je je terecht afvragen of het wel zin heeft om heel veel werk te besteden aan het verbeteren van landcomponenten in klimaatmodellen: in ieder geval het neerslagklimaat lijkt er immers niet erg gevoelig voor te zijn. Volgens andere modellen speelt land-atmosfeer interactie echter een dominante rol in het neerslagklimaat in dit gebied. Fenomenen als atmosferische golven, land-zee temperatuurcontrasten, en de dynamiek van hoge- en lage druk gebieden zijn dan kennelijk minder belangrijk. De waarheid zal er wel ergens tussenin liggen. Maar waar?

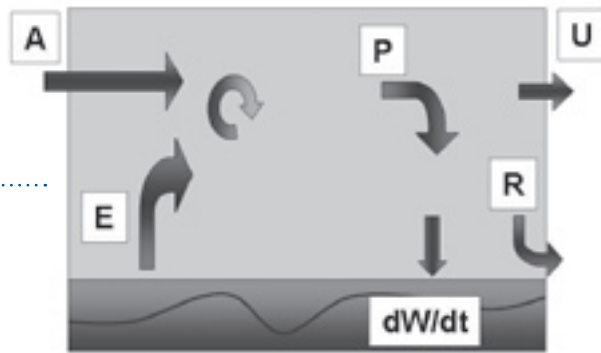
---

**Waar ik me zelf** een beetje zorgen om maak is het gevaar dat we de zaak te sterk versimpelen door het klimaatsysteem in onze modellen op te knippen in losse brokjes. We zijn er aangewend om land-experts naar landprocessen te laten kijken, neerslag-experts naar neerslagvorming, en dynamica-experts naar atmosferische golven. En het leidt ertoe dat die componenten apart worden afgeregeld, en in een klimaatmodel worden ingebouwd. En daarmee worden dan experimenten gedaan die zoveel complexe interacties vertonen dat wij met ons beperkt bevattingsvermogen moeilijk kunnen overzien waar oorzaak en gevolg in elkaar overgaan, wat wat beïnvloedt, en wat je nou moet doen om eventuele fouten op te sporen en te verbeteren. Het klimaat zelf kent die onderverdeling in componenten niet. Het klimaat is een geïntegreerd systeem waar massa of energie zich niet afvragen in welke subroutine ze nou moeten worden bewerkt. Er bestaan in werkelijkheid geen parameters die in elke gridbox dezelfde waarde moeten hebben. Bovendien kent het klimaat zowiezo geen gridboxen of tijdstappen, en is het altijd numeriek stabiel.



**Wie weet** evolueert ons denkvermogen in een richting waarin we ooit nog wel eens de immense complexiteit van het klimaat in een oogwenk kunnen overzien. Zoals we onmiddellijk het verschil tussen een wortel en een knol zien. Zover is het nog niet. Maar gelukkig kunnen we goed abstraheren. We kunnen ons een conceptuele voorstelling maken van een complex systeem. Zo'n conceptueel model is dan nog steeds een simplistische kijk op de materie, maar we kunnen ons daarmee een duidelijker beeld vormen van de interacties die er tussen componenten als hemel en aarde plaatsvinden.

*Figuur 1:*  
Een conceptueel land-atmosfeer model. Aangevoerd water (A) vormt samen met de verdamping (E) de bron van het water wat via neerslag (P) de atmosfeer weer verlaat. Het restant verdwijnt horizontaal (U). Een deel van de neerslag verdwijnt als runoff (R), en de verandering van het bodemvochtgehalte ( $dW/dt$ ) hangt af van deze netto neerslag en de verdamping.

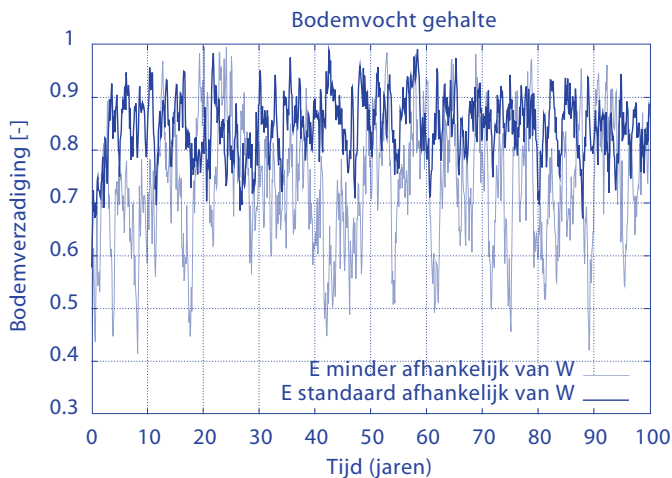


**Figuur 1 toont** een conceptueel model van het klimaat/land systeem, en dan met name de hydrologische aspecten daarvan. We slaan het complexe klimaat plat in een aantal fundamentele processen, die echter interactie vertonen met elkaar. In de bodem zien we bodemwater ( $W$ ) veranderen als er water in komt (neerslag) of uitgaat (runoff, verdamping). Die verdamping ( $E$ ) laten we afhangen van de bodemvochtvoorraad: is er veel water in de bodem, dan zullen planten de neiging hebben de verdamping niet te sterk te limiteren en is de verdamping relatief groot. Bij vochtschaarste is de verdamping kleiner dan de maximaal mogelijke, of potentiële, verdamping. De verdamping voedt de atmosfeer in de kolom boven het landoppervlak. Maar die kolom




wordt ook van water voorzien door aanvoer uit naburige gebieden (A). Samen vormen die termen de vochtvoorraad waaruit neerslag (P) kan ontstaan. Niet al het beschikbare water (A + E) valt er onmiddellijk uit, slechts een fractie  $\gamma$  laten we uitregenen. De rest verdwijnt weer naar buiten (U). In ons model zien we dus dat neerslag rechtstreeks afhangt van onder andere verdamping. En omdat die verdamping afhangt van bodemvocht, en bodemvocht weer afhangt van neerslag, hebben we hier een eenvoudige terugkoppeling gemodelleerd. Een extra tak in die terugkoppeling kunnen we aanbrengen door ook neerslagfractie  $\gamma$  afhankelijk te maken van W. Het idee hierachter is dat in een droog klimaat, waar bodemvocht in de regel dus laag is, de atmosfeer nog lang niet verzadigd is en dus relatief lastig tot neerslag zal komen. Nattere bodems verhogen die neerslagefficiëntie.

**We drijven dit eenvoudige model** aan door een beginwaarde voor W te kiezen, een paar coëfficiënten een redelijke waarde te geven, en verder de aanvoer van vochtige lucht (A) in de tijd te variëren met een zekere toevalsfactor, een ruisterm. Je ziet in *Figuur 2* een tijdserie van het bodemvocht in dit model, die dus als



*Figuur 2:* Tijdserie van bodemvocht volgens het conceptueel model in *Figuur 1* voor 2 verschillende instellingen van de mate waarin bodemvocht (W) de verdamping (E) bepaalt.




reactie op het grillige verloop van A ook een sterk fluctuerend karakter vertoont. Maar gaan we nou een paar van die coëfficiënten veranderen, verandert de hele simulatie. Maken we verdamping minder sterk afhankelijk van W dan krijg je een heel ander bodemvochtklimaat: de verdamping gaat langer door als de bodem droger wordt, en het water wordt dus sneller uit die bodem gehaald. De verblijftijd van het bodemvocht is dus korter en fluctueert rond een droger evenwicht. Een dergelijke terugkoppeling kan op een gegeven moment tot een stabiel en droog regime leiden (zoals zo'n Europese droge zomer als 2003), en heeft een externe aanvoer van vocht nodig (A) om doorbroken te worden.

---

**Het modelletje** blijkt – net als veel klimaatmodellen trouwens – erg gevoelig voor de parameterkeuze. We zijn een aantal jaren geleden op het KNMI begonnen met het maken van Europese klimaatberekeningen met zogenaamde Regionale Klimaat Modellen. In de eerste experimenten die we daarmee deden bleek er een behoorlijke systematische fout te zitten in de zomertemperaturen en neerslag in Europa. Elke zomer manoeuvreerde het model zichzelf in een droog regime, doordat kennelijk te snel in het voorjaar het beschikbaar bodemvocht was verdwenen door verdamping en er in de zomer te weinig verdamping meer kon plaatsvinden om de lokale neerslag te voeden. We hadden te maken met een wat te sterke positieve terugkoppeling, die we uiteindelijk hebben getemperd door het bodemvochtreservoir in het model een stuk groter te maken, zodat er in de zomer langer water beschikbaar was voor verdamping. De aanpassing leidde inderdaad tot een veel beter zomers neerslagklimaat, ruwweg in overeenstemming met de waarnemingen.

---

**Het probleem** en de gevolgde aanpak vormen echter wel een illustratie van hoe wij, onderzoekers, geneigd zijn om



het klimaatsysteem op te knippen in stukjes en aan individuele componenten gaan sleutelen om een betere overeenstemming met de waarnemingen te krijgen. Wie zegt dat die diepere bodem de juiste fix was? Of eigenlijk wat algemener: als we een complex systeem nabouwen met allemaal losse componenten, en zorgen dat die losse componenten goed zijn afgeregeld, werkt dan ons gecombineerde model nog steeds goed?

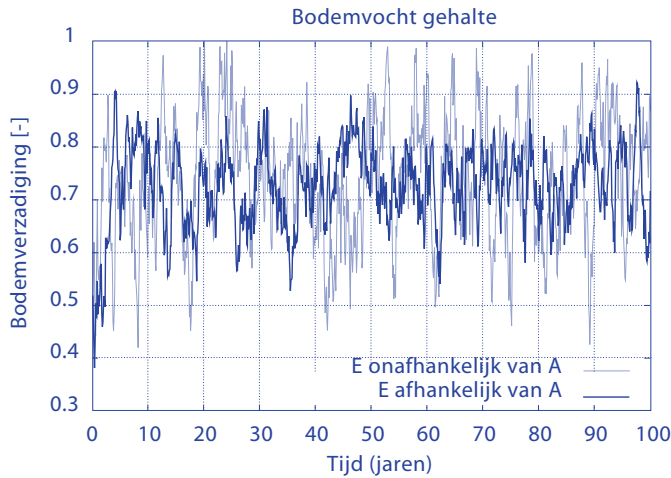
---

**Ik ga even flink speculeren** om het probleem wat duidelijker te krijgen. Laten we nog eens kijken naar die verdamping aan het aardoppervlak in dat eenvoudige modelletje van daarnet. Daarin stellen we dat de verdamping afneemt als de bodemvochtvoorraad lager wordt. Planten hebben in de evolutie een dergelijk systeem ontwikkeld om uitdroging te voorkomen. In ons model geven we dat weer door E afhankelijk te maken van W. Maar wat als planten nou eens in de toekomst konden kijken? Wat als in de evolutie planten een systeem hadden ontwikkeld om in te schatten wat het effect van hun vochtregulering is op de ontwikkeling van de atmosfeer later op de dag? Dat ze in de loop van de ochtend kunnen voelen of een te streng huidmondjesbeleid later op de dag tot een extra droge lucht zou leiden die nog meer regulering vereist? Als planten een dergelijk systeem zouden hebben, zou dat in het klimaatsysteem wellicht een extra demping kunnen betekenen. Een extra buffer die het risico op een sterke positieve terugkoppeling kan reduceren.

---

**Ik heb in m'n modelletje** zo'n extra koppeling tussen de hemel en de aarde aangebracht. Meer als gedachte-experiment dan als weergave van hoe het in de werkelijkheid werkt heb ik de verdamping een extra afhankelijkheid gegeven. Niet alleen bodemvocht reguleert E, maar ook de mate waarin de atmosfeer vocht van elders aanvoert. Wanneer er veel vocht wordt aangevoerd (de term A is dan groot) hoeven de planten niet zo bang te

*Figuur 3:*  
 Tijdserie van  
 bodemvocht volgens  
 het conceptuele  
 model met .....  
 en zonder invloed  
 van grootschalige  
 vochtanvoer (A)  
 op verdamping (E)




zijn om mee te werken aan een te droge atmosfeer. In dat geval wordt de verdamping versterkt. Anderzijds, als een droge lucht de vraag naar water te veel op dreigt te voeren wordt de verdamping extra beperkt, ook als er genoeg water in de grond zit. Het gemiddelde effect zet ik op nul. Het effect van deze extra regulering zie je in *Figuur 3*. Hier is opnieuw het verloop van het bodemvocht uitgezet tegen de tijd, en worden twee simulaties vergeleken: de standaard simulatie zonder extra afhankelijkheid van A, en eentje waarin E afhangt van A. Het effect is duidelijk te zien. Het bodemvochtgehalte fluctueert in beide gevallen rond ruwweg dezelfde waarde, maar in de nieuwe simulatie zijn de uitschieters een stuk kleiner. De kans op extreem droge condities is in deze nieuwe configuratie een stuk geringer. Ofwel: er is een extra negatieve terugkoppeling aangebracht die het systeem wat steviger op z'n plek houdt.

---

**Nogmaals:** dit voorbeeld dient niet als demonstratie van hoe de terugkoppelingen in de natuur in werkelijkheid in elkaar zitten. Het geeft een illustratie van de mate waarin die terugkoppelingen kunnen worden gedempt of versterkt naarmate je meer





of minder interacties aanbrengt in het systeem. Het is daarnaast ook een illustratie van hoe we in het ontwerp van modellen van dit complexe klimaatsysteem voorbij de grenzen van de individuele componenten kunnen kijken. We bouwen in dit voorbeeld een directe brug tussen de landcomponent en de atmosfeer component. In een complex klimaatmodel zou dit kunnen betekenen dat de huidmondjestoestand van planten niet alleen af zou moeten hangen van de lokale laag-bij-de-grondse omstandigheden, maar dat bijvoorbeeld processen als grenslaagventilatie (entrainment) of grootschalige vochtconvergentie de verdamping aan het oppervlak mede gaan bepalen. Het illustreert een nieuwe manier van denken bij de evaluatie en ontwikkeling van modellen van het complexe klimaatsysteem.

---

**Mijn promotiewerk** in Wageningen richtte zich voornamelijk op de relatief kleinschalige processen die zich rond dat landoppervlak afspelen. We hebben tussen de wijnstruiken in Spanje gemeten aan warmtefluxen, aan huidmondjes, aan temperaturen en vochtgehaltes in de bodem. *Henk de Bruin*, de moeilijk te overschatten begeleider in die voor mij zo belangrijke periode, heeft me echter steeds gewezen op het feit dat er tussen hemel en aarde meer is dan metingen en modelletjes van die kleine landcomponenten. De modelletjes moeten uiteindelijk wel gaan werken in interactie met andere componenten. Dus hop, niet alleen de landprocessen zelf werden in mijn promotie nauwkeurig bekeken, ook de verticale koppeling aan de atmosferische grenslaag speelde een rol in het onderzoek.


---

**Eenmaal aan het werk** op het KNMI was het *Anton Beljaars* die me volop inspireerde om het weer wat groter te zien. In weermodellen is land-atmosfeer interactie een bekend probleem, omdat het kan leiden tot bodemuitdroging op grote, Europese schaal. Dus zocht ik naar manieren om met waarnemingen het weermodel

af en toe bij te sturen, om te voorkomen dat in de modelwerkelijkheid compleet Europa zou verwoestijnen.

---

**Een paar jaar later** kwam er weer een schaaldimensie bij. Niet alleen de weersverwachting is afhankelijk van de representatie van land-atmosfeer interactie, maar ook het klimaat op Europese schaal is er gevoelig voor. Samen met vooral *Pedro Viterbo*, *Bert Holtslag*, *Erik van Meijgaard* en *Geert Lenderink* heb ik in de groep onder leiding van *Aad van Ulden* flink gesleuteld aan landprocessen in een regionaal klimaatmodel. *Gerbrand Komen* stuurde er later op aan om dit werk via een aantal tussenprojecten zoals RegioKlim uit te laten monden in de constructie van een hele nieuwe generatie klimaatscenario's voor Nederland en wijde omgeving. Een mooie klus, waarbij ik enorm heb genoten van het inspirerende teamwerk op het KNMI en de grote belangstelling vanuit de buitenwereld voor de resultaten.



---

**Maar ook die regionale klimaatmodellen** zijn uiteindelijk te beperkt. De land-atmosfeer interactie beperkt zich allerminst tot een verticale koppeling tussen de hemel en de aarde. De hemel overspant de hele aarde, zou je kunnen zeggen, niet alleen de gridbox die er direct onder ligt. Een droge bodem in centraal Europa kan temperatuur- en drukgradiënten beïnvloeden die de aanvoering van lucht compleet kunnen veranderen. De ligging van hoge en lage drukgebieden kan voorkomen dat vers water vanaf de oceaan wordt aangevoerd, door een hardnekkige zuidoostelijke wind bijvoorbeeld. Ook hier kan een positieve terugkoppeling er dus voor zorgen dat hittegolven zichzelf in stand houden; een terugkoppeling tussen de waterhuishouding in de bodem en de atmosferische circulatie. De werkelijke interactie overspant grote afstanden. En dat vergt studies met grote modellen, mondiale modellen. Mijn recente overstap naar de KNMI-afdeling Mondiaal Klimaat


onder leiding van *Wilco Hazeleger* is een volgende stap in mijn carrière waarin de blik op de materie steeds verder verruimd wordt.

---

**En het zal allerminst** de laatste stap zijn. Samen met collega's en studenten van KNMI en IMAU blijven we ons verbazen over de grilligheid, de complexiteit, het vernuft, en de robuustheid van dat complexe en fascinerende klimaatsysteem. En verbazing is, zoals u weet, de sleutel tot de eeuwige jeugd, de eeuwige drijfveer om meer te ontdekken, meer te weten, meer te verbazen. We blijven zoeken naar de voorspelbaarheid van het systeem, en we zullen de methoden om die uit te buiten verder verfijnen. En ongetwijfeld brengen we beter in kaart wat de fundamentele beperkingen van die voorspelbaarheid zijn: de gebieden waarin we ons dus noodzakelijkerwijs letterlijk over zullen moeten geven aan de interactie tussen hemel en aarde.

---

**Het is fijn om op deze plek** de aandacht even af te wentelen op een aantal dierbaren in mijn omgeving. Ik wil deze oratie graag opdragen aan *mijn moeder*. Natuurlijk omdat ze mij onder de hemel op aarde heeft neergezet. Maar ook omdat juist zij me ervan bewust maakt dat je je altijd die vraag kunt stellen: 'Is er meer?' En dat is natuurlijk altijd waar. Wetenschap bedrijven is vragen stellen. En los daarvan: zelfs een volwassene doet het goed om de trots van een moeder te voelen.




---

**Ook Christien** verdient een plek in mijn dankwoord. Voor al die jaren dat ze achter me stond, en heeft bijgedragen aan de ontwikkeling tot wie ik nu ben.

---

**Ik prijs me gelukkig** met al die positieve interactie met overige familieleden, collega's en vrienden. Nergens is het helende effect van interactie duidelijker voelbaar dan in al die gesprekken, al die repetities met mijn dierbare Kix- en KAK-genoten, de



briefwisselingen met intimi, de gedeelde verbazing over hoe we in elkaar zitten, hoe de natuur in elkaar zit, over de schoonheid van kunst. Hoe bijzonder deze interacties voor me zijn kan niet beter worden gedemonstreerd dan met bijzondere muziek. De Nederlandse groep *Bløf* componeerde een paar jaar geleden het lied '**Vrij**': *met je voeten op de grond, en je handen bij de zon*. Een mooiere metafoor voor de interactie tussen hemel en aarde, of tussen land en atmosfeer is nauwelijks denkbaar. Het vrijwel voltallige *Klein Amersfoorts Koor* gaat onder leiding van dirigent en vriend *Ronald Becker* het arrangement zingen wat ik een paar jaar geleden heb gemaakt van dit nummer. Bedankt voor jullie komst, en veel plezier met '**Vrij**' zijn.