

Complexe aarde en de toekomst:

kantelpunten in ecosystemen en klimaat?

Oratie uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar
'Milieuwetenschappen, in het bijzonder ruimtelijke ecologie en global
change' aan de faculteit Geowetenschappen van de Universiteit Utrecht
op 28 april 2011 door Max Rietkerk

Universiteit Utrecht



COLOFON

ISBN

978 90 6266 277 7

Uitgave

Universiteit Utrecht, 2011

Grafische verzorging

C&M - Faculteit Geowetenschappen - Universiteit Utrecht

Foto voorzijde

Vegetatiepatronen in de Sahel

Druk

Bergdrukkerij, Amersfoort

Mijnheer de Rector Magnificus, geachte aanwezigen,

Inleiding

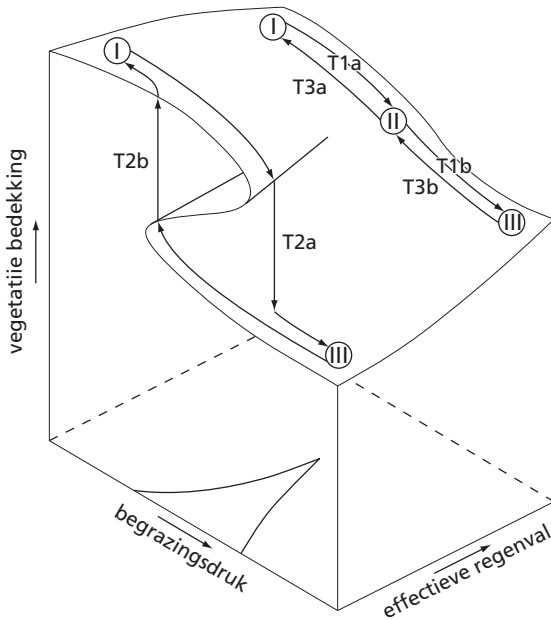
Graag wil ik bij u mijn leerstoel Ruimtelijke ecologie en ‘global change’ inleiden. Dat zal ik onder andere doen door u een gedeelte van mijn onderzoek te vertellen, afgewisseld met mijn wetenschapsvisie en anekdotes die bij de ontwikkeling daarvan van belang zijn geweest.

Het vakgebied Ruimtelijke ecologie is ondergebracht binnen het domein van de Milieuwetenschappen. Milieuwetenschappers bestuderen het effect van menselijk handelen op ons milieu, tegenwoordig ook wel klimaat genoemd. Later zal ik beargumenteren waarom dat laatste een vergissing is. Ons milieu bestaat uit niet-levende elementen, zoals water en zuurstof, en levende organismen. Organismen van dezelfde soort vormen populaties, en populaties van verschillende soorten vormen gemeenschappen. Samen met het niet-levende deel van de natuur vormen die gemeenschappen weer ecosystemen. Een tropisch bos en de Arctische toendra zijn voorbeelden van ecosystemen. De Ruimtelijke ecologie bestudeert hoe de ruimtelijke interacties tussen het levende en niet-levende deel van ecosystemen bepaalde ruimtelijke patronen en temporele dynamiek kunnen verklaren. Nu leven wij in een wereld die gedomineerd wordt door menselijk handelen wat vele veranderingen tot gevolg heeft (Vitousek et al., 1997). Dat is niet alleen klimaatsverandering door toename van CO₂ als gevolg van het verbranden van fossiele brandstoffen, maar ook bijvoorbeeld vervuiling door een overschot aan stikstof in het milieu te brengen, of overbevissing van onze zeeën, waardoor hele vispopulaties catastrofaal in elkaar kunnen storten. Milieuveranderingen door menselijk handelen met een wereldwijd karakter worden in de milieuwetenschappen ook wel aangeduid met de Engelse term ‘global change’. Mijn leeropdracht heet dan ook Ruimtelijke ecologie en ‘global change’.

Kantelpunten

Graag maak ik u deelgenoot van mijn zoektocht naar hoe door mensen veroorzaakte veranderingen kunnen leiden tot kantelpunten in ecosystemen en in het klimaat en wat de ruimtelijke ecologie daarmee van doen heeft. Het was ver in de vorige eeuw, om precies te zijn 1993, toen ik werkte als

onderzoeksassistent bij de toenmalige vakgroep Terrestrische Ecologie en Natuurbeheer van de Landbouwniversiteit te Wageningen. Ik werd daar vereerd met een persoonlijk bezoek van Leo Stroosnijder, hoogleraar bij de toenmalige vakgroep Irrigatie en Bodem- en Waterconservering aan dezelfde universiteit. Hij kwam met de vraag of ik eens mijn gedachten over kantelpunten in verwoestijning op een A4tje kon zetten. Verwoestijning door overbegrazing en droogte is nu nog steeds een actuele bedreiging voor droge ecosystemen, die meer dan 40% van het landoppervlak bedekken en waar meer dan 30% van de wereldbevolking leeft (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). De toenmalige Landbouwniversiteit had een onderzoeksprogramma in de West Afrikaanse Sahel, waar grote gebieden overbegraasd werden. Van de jaren vijftig tot de jaren



Figuur 1. Het cusp catastrofe model toegepast op de vegetatiedynamiek in de Sahel. De vectoren over het evenwichtsooppervlak zijn waargenomen vegetatietransities (Rietkerk et al. 1996).

negentig van de vorige eeuw was de graasdruk in de Sahel verdrievoudigd en er waren tegelijkertijd grote droogtes, met grootschalige verwoestijning als gevolg (Van de Koppel et al., 1997). Het A4tje werd vervolgens een onderzoeksvoorstel en uiteindelijk een promotietraject, waarbij Leo Stroosnijder en Herbert Prins mijn promotoren waren. Laatstgenoemde, hoogleraar bij de groep waar ik begon als onderzoeksassistent, kwam al snel met het idee dat ik eens de catastrofe theorie moest bestuderen; een wiskundige theorie van de Fransman René Thom, die verschillende typen kantelpunten beschrijft (Thom, 1975). En inderdaad bleek de verwoestijning dezelfde eigenschappen te hebben als bepaalde kantelpunten zoals in de theorie beschreven (Rietkerk et al., 1996; Figuur 1), en mijn eerste artikel van mijn proefschrift was geboren.



Figuur 2. Dalí poseert hier voor zijn laatste schilderij 'La queue d'aronde-Série des catastrophes' ('De zwaluwstaart-Serie catastrofes'). Naast de zwaluwstaart is de cusp catastrofe afgebeeld. Uit: Descharnes en Néret 2001. © Salvador Dalí, Fundación Gala-Salvador Dalí, c/o Pictoright Amsterdam 2011.

Ik wil kort de drie belangrijkste eigenschappen van die kantelpunten noemen om alle neuzen dezelfde richting op te krijgen. Allereerst is er het plotseling omslaan van een evenwicht van een systeem, als gevolg van een geleidelijke verandering van een omgevingsvariabele. Dus in dit voorbeeld kunnen kleine veranderingen in graasdruk of regenval plotseling tot verwoestijning leiden; de vegetatie stort als het ware in. Ten tweede zijn er bepaalde omstandigheden waarbij verschillende evenwichten stabiel zijn. In dit voorbeeld zijn dat een gezonde vegetatie en een woestijn. Welk evenwicht zich uiteindelijk handhaaft, hangt af van de geschiedenis van het ecosysteem. Ten derde is het zo dat wanneer het evenwicht is omgeslagen naar een woestijn, het oorspronkelijk evenwicht weer moeilijk te herstellen is, wat we hysteresis noemen.

Even een zijpaadje op. Kantelpunten blijken niet alleen wetenschappers te inspireren, maar ook kunstenaars. Zoals Salvador Dalí, de surrealistische schilder die goed bevriend was met de wiskundige René Thom, aan wie Dalí zijn laatste schilderij heeft opgedragen, waarop de kantelpunten van Thom zijn afgebeeld (Figuur 2). U ziet Dalí hier trots poseren naast dat laatste schilderij, vlak voor zijn dood. Salvador Dalí was zeer geïnteresseerd in wetenschap, las wetenschappelijke literatuur en volgde wetenschappelijke debatten. Toen eens aan hem werd gevraagd door een journalist: “Waarom heeft u zoveel interesse in de wetenschap?” antwoordde hij: “Omdat kunstenaars me nauwelijks interesseren, ik geloof dat kunstenaars notie moeten hebben van wetenschap”. Met dit soort schilderijen zocht hij de overeenkomsten tussen kunst, muziek en wetenschap. Of het schilderij mooi is of niet, daar kunnen we over van mening verschillen, maar er zit in ieder geval een mooi idee achter.

Wetenschappelijke theorieën dienen verder te gaan dan een beschrijving van verschijnselen, omdat een goede theorie ook verklarend en voorspellend dient te zijn. Voorspellingen die vervolgens getoetst kunnen worden door ze met data te confronteren. In dat opzicht bleek de catastrofe theorie geen goede wetenschappelijke theorie omdat het slechts helpt te beschrijven en te deduceren welk mechanisme de kantelpunten potentieel zou kunnen verklaren. Maar verklarend en voorspellend is die theorie helemaal niet. Het mechanisme waar we aan dachten was dat vegetatie de hoeveelheid bodemvocht vergroot, doordat het regenwater makkelijker de bodem in sijpelt als er veel vegetatie is, waar de

vegetatie weer van profiteert. We noemen dit het infiltratiemechanisme. Dat is een potentieel mechanisme voor kantelpunten, redeneerde we, omdat dit een zogenaamde positieve terugkoppeling inhoudt; meer vegetatie zorgt voor meer bodemvocht, wat weer voor meer vegetatie zorgt, maar andersom werkt het ook en kan een negatieve spiraal van verwoestijning in gang worden gezet. Positieve terugkoppeling betekent dus dat een effect zichzelf versterkt, in tegenstelling tot negatieve terugkoppeling waarbij een effect vanzelf weer wordt gedempt.

Om na te gaan of een dergelijk mechanisme inderdaad de kantelpunten zou kunnen verklaren, hebben we dynamische modellen gemaakt met differentiaalvergelijkingen. Weer komt de wiskunde van pas, maar op een heel andere manier; nu was het om onze verbale redenering van oorzaak en gevolg te controleren. Dus om een verklarende en voorspellende theorie te ontwikkelen. We gingen nu uit van sterk versimpelde dynamische modellen, zodat we het gesimuleerde gedrag van het model goed kunnen begrijpen. We konden zo het effect van bijvoorbeeld het infiltratiemechanisme op het modelgedrag bestuderen door in het model het mechanisme aan en uit te schakelen, of langzaam te versterken. Inderdaad bleek toen dat dit terugkoppelingsmechanisme de kantelpunten kon verklaren (Rietkerk en Van de Koppel, 1997; Rietkerk et al., 1997). Het modelgedrag liet zien dat bij toenemende begrazing de vegetatie geleidelijk afneemt, tot een bepaalde drempelwaarde. Op een gegeven moment is er dan niet genoeg vegetatie voor voldoende bodemvocht en andersom. Het model bevestigde hoe de vegetatie dan plotseling in elkaar kan storten, waarna ditzelfde terugkoppelingsmechanisme het moeilijk maakt voor de vegetatie om te herstellen.

Ruimtelijke patronen

Nu hadden we het kantelpunt beschreven met behulp van de catastrofe theorie, en een mogelijke verklaring van de kantelpunten gegeven aan de hand van mathematische modellen. Vervolgens zijn we in het veld gaan meten of het infiltratiemechanisme inderdaad werkt. En inderdaad was het duidelijk dat de infiltratiesnelheid drastisch kan toenemen met de vegetatiebedekking, afhankelijk van het type vegetatie en bodem. Echter, we zagen ook tijdens een regenbui dat regenwater wat op een kale plek niet kan infiltreren, nog wel kan wegstromen over het oppervlak naar plekken met vegetatie, waar het vervolgens wel kan infiltreren. We zagen dus dat ruimtelijke processen belangrijk waren. Dus we

hebben het model uitgebreid met een component oppervlaktewater wat kon stromen van één plek naar de andere, en we zorgden ervoor dat ook planten en bodemwater zich ruimtelijk konden verspreiden.

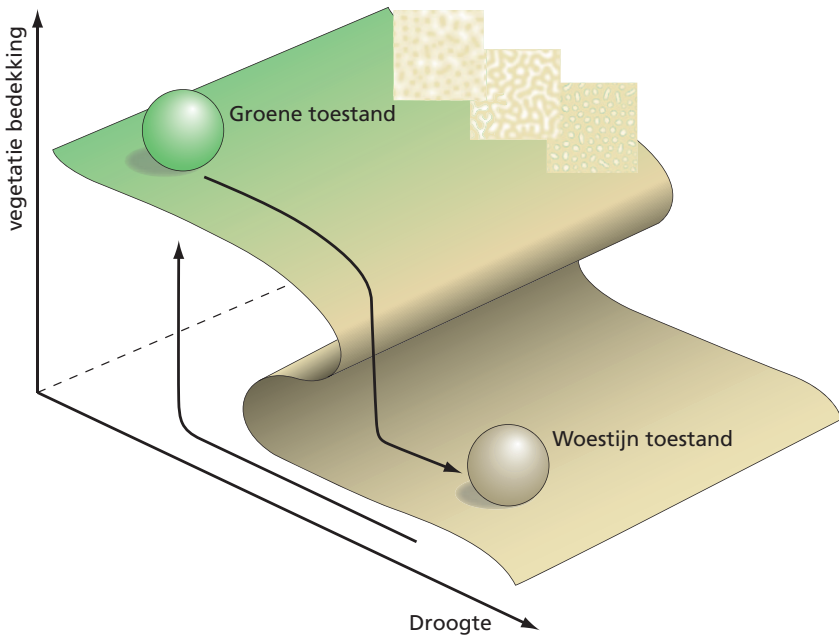
Ik wil u de volgende modelsimulatie niet onthouden. We starten het model met een stuk kale grond van 400 x 400 meter groot. We strooien vervolgens random zaadjes over het gebied en we starten de simulatie. De kale bodem is de lichtbruine kleur en de vegetatie die zich ontwikkelt de donkergroene. Van links naar rechts neemt de hoeveelheid regenval toe. We rekenen in stapjes van een dag en laten het model 3000 dagen rekenen. De vegetatie organiseert zichzelf in regelmatige ruimtelijke patronen, die vervolgens stabiel blijven. We onderscheiden hier zo op het oog drie verschillende typen patronen, die we 'spots', 'labyrinths' en 'gaps' noemen (Rietkerk et al., 2002; Figuur 3). Wanneer we het infiltratiemechanisme in dit model uitzetten, dan ontstaan deze patronen niet; de vegetatie is dan homogeen verdeeld.

Hoe kunnen we het ontstaan van deze ruimtelijke patronen in het model verklaren? Allereerst is er niet voldoende water voor een volledige vegetatiebedekking, vandaar de afwisseling van kale bodem en vegetatie, iets wat algemene regel is in dit soort ecosystemen. Vervolgens zijn er twee terugkoppelingsmechanismen tegelijkertijd actief, maar op een verschillend ruimtelijk schaalniveau. Binnen de plekken met vegetatie helpen de planten elkaar, doordat het infiltratiemechanisme werkt. We noemen dit proces facilitatie. Tegelijkertijd valt er veel regenwater op kale bodem, wat daar niet kan infiltreren.



Figuur 3. Gesimuleerde ruimtelijke vegetatiepatronen. Gesimuleerd oppervlak is 400x400 m. Groen is vegetatie en bruin is kale bodem. Van links naar rechts afnemende regenval. A. 'Gaps', B. 'Labyrinths', C. 'Spots' (Rietkerk et al. 2002).

Maar het water kan dus wel afstromen naar plekken met vegetatie, waar het vervolgens wel kan infiltreren. Dit betekent dat de plekken vegetatie de kale plekken nodig hebben om water vandaan te halen. Dit houdt ook in dat de plekken vegetatie concurreren om het water van de kale plekken. We noemen dit proces concurrentie. Het feit dat beide processen tegelijkertijd plaatsvinden, maar op verschillende ruimtelijke schaalniveau's, leidt tot dit type ruimtelijke patroonvorming. Planten willen zo dicht mogelijk bij elkaar staan, vanwege facilitatie, maar tegelijkertijd zo dicht mogelijk bij de kale grond, vanwege concurrentie, wat leidt tot dit regelmatig ruimtelijk patroon, waarmee elke plant voordeel heeft. Een win-win situatie dus, wat in de natuur zeer veel voorkomt op basis van allerlei mechanismen, en wat denk ik nog veel belangrijker is dan



Figuur 4. De ruimtelijke patronen laten zien hoe dicht het ecosysteem bij een kantelpunt zit (Rietkerk et al. 2004; bewerkt figuur van Rietkerk et al. 2002 en Solé 2007).

concurrentie. Als de win-win situatie zich ook voordoet tussen verschillende soorten, dan kan dit bijvoorbeeld een hoge biodiversiteit verklaren.

Het onvoorspelbare voorspellen?

Maar we waren toch op zoek naar kantelpunten? En er was nog een belangrijke vraag niet opgelost, en dat was hoe kan je die kantelpunten nu aan zien komen? Want kantelpunten zijn niet te voorspellen; het is bij voorbaat niet bekend of het ecosysteem gaat instorten, en bij welke hoeveelheid vegetatie of regenval dat dan gebeurt. Wat bleek nu; de ruimtelijke patronen en kantelpunten zijn twee kanten van dezelfde medaille! Ons model voorspelde dat wanneer zich ruimtelijke patronen vormden, dit ook inhield dat er kantelpunten waren. En dat niet alleen, de vorm van de ruimtelijke patronen voorspelt hoe dicht we bij zo'n kantelpunt zitten (Rietkerk et al. 2004; Figuur 4)!

Deze modelresultaten verrasten ons, want we waren niet op zoek naar dergelijke vegetatiepatronen, en we wisten al helemaal niet of dit soort patronen in de natuur voorkwamen. In de wetenschap noemen we dit verschijnsel (iets vinden waar je niet op zoek naar was) serendipiteit. Ik zal daar nog een paar keer op terug komen. Toen we onze modelresultaten – de spontaan gevormde vegetatiepatronen – aan een collega-wetenschapper lieten zien, gebeurde er weer iets verrassends. Namelijk hij opende zijn la en liet ons luchtfoto's zien waaruit bleek dat de patronen in de natuur echt voorkomen. Deze wetenschapper had die la tot dan toe angstvallig gesloten gehouden, omdat die patronen nog niet konden worden gereproduceerd door zijn modellen, wat hij wel had geprobeerd. En het is niet alleen zo dat die patronen voorkomen in de natuur, ze zijn zelfs zeer algemeen. Een zondagmiddag Google Earth levert al een schat van informatie op! Hier ziet u regelmatige patronen die voorkomen langs een regenvalgradient in de Sahel in West Afrika. Maar de patronen komen voor langs de randen van elke droge woestijn in de wereld (De Blauwe et al. 2008).

Turing en ecologie

Wetenschappers zijn afhankelijk van collega's en staan op de schouder van voorgangers. Allan Turing was een briljante Britse wiskundige, die geïnteresseerd raakte in de chemie en biologie. Hij is de uitvinder van de zogenaamde Turing patronen. Hij voorspelde in 1952 (Turing 1952) dat het mogelijk was dat spontaan

regelmatige ruimtelijke patronen konden ontstaan in een chemische reactie wanneer twee stoffen met elkaar reageren en verspreiden door diffusie. Hij toonde dit aan met een wiskundig model en dat was opmerkelijk omdat tot die tijd altijd werd gedacht dat diffusie per definitie tot homogene verspreiding moet leiden. Maar Turing toonde dus wiskundig aan dat dit niet het geval hoeft te zijn. Interessant te vermelden is dat het experimentele bewijs voor een dergelijke reactie lang op zich liet wachten, namelijk tot 1990 (Castets et al. 1990)! Dus Turing was met zijn werk decennia vooruit. Met dezelfde principes kunnen de vachtpatronen op b.v. zebra's worden verklaard. Turing stond ook aan de wieg van de computer met het uitvinden van zijn Turing machine in 1937, en schreef in 1948 al een computerprogramma voor een schaakspel voor een computer die nog niet bestond! Ook heeft hij de loop van de Tweede Wereldoorlog mede bepaald door geheime Duitse codes te kraken. Schokkend is dat Turing in 1952 – (nog geen 60 jaar geleden...) – in Engeland veroordeeld werd voor homosexualiteit, waarbij hij kon kiezen voor gevangenisstraf of chemische castratie. Hij koos voor het laatste en pleegde zelfmoord in 1954. Het heeft tot 2009 geduurd eer de Engelse overheid officieel excuses heeft aangeboden bij monde van Gordon Brown voor de manier waarop Allan Turing is behandeld.

Turing kon niet bevroeden dat zijn theorie 60 jaar later van stal zou worden gehaald om ruimtelijke patronen in de ecologie te verklaren! Turing-patronen komen niet alleen in droge ecosystemen voor, maar ook in natte veengebieden (Eppinga 2009). Hier kwamen we achter door – u raadt het al – serendipiteit. Toen ik overstapte van Wageningen Universiteit naar Universiteit Utrecht en ik hier over die vegetatiepatronen in droge ecosystemen begon, kwam collega Martin Wassen met een stapel foto's aan, genomen vanuit een helikopter in Siberië. En zo kwamen we op het idee dat, zoals in droge gebieden de ruimtelijke herverdeling van water ten grondslag ligt aan de patronen, dit in natte veengebieden wel eens de ruimtelijke herverdeling van nutriënten zou kunnen zijn. Toenmalig promovendus Maarten Eppinga laat dit op een elegante manier zien, aan de hand van wiskundige modellen en daaraan gerelateerde observaties in het veld (Eppinga 2009). Deze natte veengebieden zijn van belang omdat ze CO₂ uit de atmosfeer opslaan als organisch materiaal. Maar ook in mosselbanken, koraalriffen en tal van andere ecosystemen worden Turingpatronen waargenomen (Rietkerk en Van de Koppel 2008). Steeds blijkt de afwisseling van positieve en

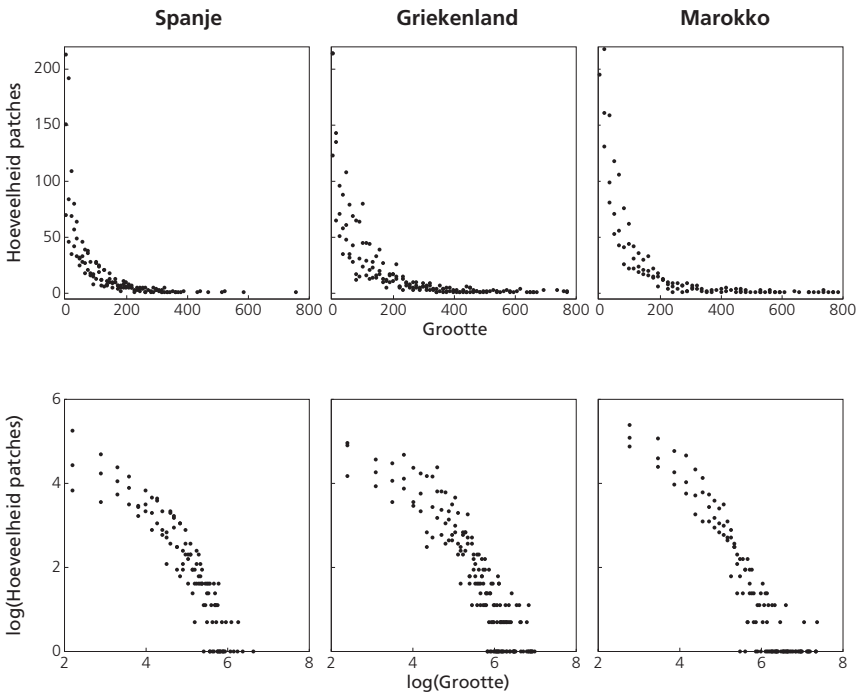
negatieve terugkoppeling in de ruimte de basis te zijn voor de verklaring van de patronen. En dit is allemaal dezelfde basis die ten grondslag ligt aan het ontstaan van de patronen in het model van Turing.

Nog meer patronen?

Niet de hele wereld bestaat uit regelmatige patronen. Zelfs niet het overgrote deel van de wereld. Toenmalig promovenda Sonia Kéfi analyseerde bijvoorbeeld het aantal en de afmetingen van plekken bedekt met vegetatie ('vegetatie patches') in Spanje, Griekenland en Marokko. De data werd verstrekt door Inma Alados, een collega uit Spanje met wie we samenwerken. Wat bleek nu? Ondanks de zeer uiteenlopende typen vegetatie en omstandigheden blijkt de ruimtelijke verdeling van plekken vegetatie zich aan een wiskundige wetmatigheid te houden (Kéfi et al. 2007; Figuur 5). Op de bovenste rij is de hoeveelheid plekken bedekt met vegetatie afgezet tegen de afmeting van die plekken. Het blijkt nu dat er altijd veel meer kleine plekken zijn dan grote en dat de relatie daartussen een vast verband heeft. Als de assen logaritmisch worden uitgezet zoals op de onderste rij dan ontstaat er een rechte lijn.

Nu is er data verzameld in die drie verschillende landen voor drie verschillende niveaus van begrazing; begrazing met weinig grazers, een middelmatige hoeveelheid grazers, of veel grazers per eenheid oppervlakte. En wat bleek nu. Ook de verandering in de ruimtelijke verdeling van de plekken vegetatie met toenemende begrazingsdruk voldoet aan een wetmatigheid. Zowel in Spanje, Griekenland en Marokko, verandert de oorspronkelijke rechte lijn in een kromme lijn. De oorzaak zit hem erin dat vooral de hoeveelheid grote patches disproportioneel afneemt; de grote patches vallen uiteen in meerdere kleine plekken vegetatie als gevolg van begrazing. We noemen dit proces fragmentatie. Hoe kunnen we dit verklaren en wat zou er gebeuren als we deze resultaten extrapoleren naar een nog hogere begrazingsdruk?

Dit kon Sonia Kéfi analyseren met behulp van een type model wat we cellulaire automaat noemen. Een cellulaire automaat heeft een beperkt aantal mogelijke toestanden waarin cellen zich kunnen bevinden in een ruimtelijk domein. We kunnen de transitie tussen die toestanden beschrijven in afhankelijkheid van de toestanden van de buurcellen. In dit geval definieerden we drie toestanden:



Figuur 5. Vaste relatie tussen hoeveelheid begroeide plekken en hun grootte (cm) (Kéfi et al. 2007).

bedekt met vegetatie, kaal en gedegradeerd ofwel geërodeerd. Een kale plek kan begroeid worden doordat zaad kiemt en een plek met vegetatie kan kaal worden doordat de plant dood gaat. Een kale plek kan vervolgens eroderen, waardoor een gedegradeerde plek ontstaat, waar vervolgens geen zaad meer kan kiemen. Voordat er zaad kan kiemen zal zo'n plek zich eerst weer moeten herstellen en daarmee veranderen van een gedegradeerde plek naar een kale plek. We noemen dat regeneratie en dat kan plaatsvinden doordat de bodem verbeterd bijvoorbeeld door toevoeging van organisch materiaal en betere water infiltratie.

Nu is de belangrijkste aanname in dit model dat het regeneratieproces sneller gaat naar mate er meer begroeide buurcellen zijn. Dit noemen we ook wel lokale facilitatie.

Inderdaad gaf het model precies dezelfde uitkomsten als we hadden waargenomen in werkelijkheid! Bij lage begrazingsdruk vonden we een lineair verband tussen de hoeveelheid en de afmeting van begroeide plekken, indien logaritmisch uitgezet. Met toenemende begrazing veranderde dat in een kromme lijn, net zoals we in het veld hadden gemeten. Ook in het model vond fragmentatie plaats; grote begroeide plekken vielen uiteen in meerdere kleine plekken. Nadere modelanalyse wees uit dat de kromme lijn uitsluitend en altijd voorkwam vlak voor transitie naar woestijn, ongeacht of er een kantelpunt aanwezig is in het ecosysteem of niet, en onafhankelijk van de totale vegetatie bedekking. Dit is van belang omdat we hiermee een aanvullende indicator hebben wanneer we bij een mogelijk kantelpunt zitten en omdat we op voorhand niet weten bij welke bedekking zo'n kantelpunt optreedt. Ook hier weer geeft de ruimtelijke verdeling van vegetatie belangrijke informatie prijs over de dynamiek van het ecosysteem. Deze resultaten leverde ons een coverartikel in *Nature* op (Kéfi et al. 2007). En let wel, weer waren we op voorhand niet op zoek naar dergelijke patronen en dit werk is dan ook weer een erg mooi voorbeeld van serendipiteit.

Onderzoeksprioriteiten voor de toekomst

Eén van de onderzoeksprioriteiten is nu voor welke mechanismen en onder welke omstandigheden de ruimtelijke patronen één op één gekoppeld zijn aan kantelpunten en of je aan die ruimtelijke patronen kan zien hoe dicht je bij een kantelpunt zit (bv Scheffer et al. 2009, Kéfi et al. 2011). We beginnen het gedrag van modellen aardig te begrijpen indien we het simpel houden, echter het is nu noodzakelijk dat de modellen systematisch worden geconfronteerd met de mechanismen in de natuur en het gedrag van ecosystemen. Dit doen we tegelijkertijd met het verder verbeteren en verfijnen van de modellen en het speuren naar indicators voor kantelpunten. Daarbij werken we o.a. gefinancierd door de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek NWO in verschillende samenwerkingsverbanden; binnen de Faculteit, met de Universiteit van Leiden en het Centrum voor Wiskunde en Informatica, maar ook met

internationale partners zoals de Universiteit Carlos III en Universiteit van Alcalá, beiden in Madrid. Ook bestuderen we het effect van het proces van facilitatie tussen verschillende plantensoorten door middel van experimenten. We denken namelijk dat facilitatie tussen plantensoorten essentieel is om kantelpunten te begrijpen, want als onderlinge afhankelijkheidsrelaties worden verstoord kan dit leiden tot een domino-effect. Dit doen we ook gefinancierd door NWO o.a. samen met de Universiteit van Groningen. Maar ook hier zijn weer internationale partners betrokken, zoals de Universiteit van Alicante, en de instituten CSIC in Zaragoza en CRNS in Montpellier.

Ik heb u voorbeelden gegeven hoe positieve zichzelf versterkende terugkoppelingsmechanismen op een klein schaalniveau kan leiden tot spontaan gevormde ruimtelijke patronen en kantelpunten op een groter schaalniveau. De terugkoppelingsmechanismen spelen zich af op lokale ruimtelijke schaal, ongeveer over afstanden van 10-100 m. Wat de effecten zijn van deze lokale terugkoppelingsmechanismen op het gedrag van kantelpunten in ecosystemen en of er indicatoren zijn gerelateerd aan deze kantelpunten is nu een belangrijke onderzoekslijn. Een andere onderzoekslijn die we koppelen aan de zojuist genoemde onderzoekslijn gaat over positieve terugkoppelingsmechanismen tussen eigenschappen van het aardoppervlak en het klimaat op regionale schaal over afstanden van 10-100 km (Rietkerk et al. 2011). En wat de effecten zijn van deze terugkoppelingsmechanismen op kantelpunten in het klimaat. Een voorbeeld van een dergelijk positief terugkoppelingsmechanisme is dat meer vegetatie in de Sahel leidt tot meer verdamping en meer regen, wat weer leidt tot meer vegetatie (Dekker et al. 2007).

De mens zou in staat moeten zijn om die positieve terugkoppelingsmechanismen in gang te zetten met oplossingsmaatregelen om verwoestijning tegen te gaan. Door verwoestijnde gebieden te beplanten in een regelmatig ruimtelijk patroon, kan dus niet alleen het infiltratiemechanisme in gang worden gezet, maar kan ook nog eens meer regenval worden gegenereerd door toename van de verdamping. Het ecosysteem kan zichzelf dan weer in stand houden. Uiteraard zal dat laatste alleen gebeuren als we dit op een grote schaal zouden doen van bijvoorbeeld honderden vierkante kilometers (Claussen 1997, Dekker et al. 2007).

En zo zijn er in de literatuur veel terugkoppelingsmechanismen gesuggereerd op verschillende schaalniveaus, zowel positieve en negatieve en afhankelijk van de omstandigheden. Daar bovenop is het nog eens zo dat de verschillende terugkoppelingsmechanismen op de verschillende schaalniveaus ook nog eens elkaar beïnvloeden. Ik noem dit in een Engelse term ‘cross-scale links’ (Rietkerk et al. 2011). Dit zijn bijvoorbeeld de hydrologische cyclus en de stralingsbalans. We zijn nu aangeland bij wat in de wetenschap wordt aangeduid met complexiteit. En de systemen waar we mee te maken hebben, zoals ecosystemen en het klimaat, zijn zogenaamde complexe systemen. Hierin spelen terugkoppelingsmechanismen en kantelpunten een belangrijke rol, die elkaar beïnvloeden, op verschillende schaalniveaus in ruimte en tijd, en afhankelijk van omstandigheden. Dit is een belangrijk thema waar we onderzoek naar doen, bijvoorbeeld in ons Focus en Massa project, gefinancierd door Universiteit Utrecht en in samenwerking met het Institute of Environmental Biology, het IMAU en KNMI.

Klimaatbeleid?

Nu is een oratie ook voor om een kritisch punt te maken. Dat zal ik nu doen. Waarna ik zal afronden met een persoonlijk verhaal, iets over het huidige politieke klimaat, en een dankwoord. We begrijpen de complexe aarde nog niet genoeg voor een klimaatsdoelstelling van maximaal 2 graden temperatuurstijging en we moeten het klimaatbeleid weer milieubeleid gaan noemen. Complexe systemen zoals ecosystemen en het klimaat proberen we te begrijpen en te voorspellen door modellen te maken. Modellen kunnen eenvoudig zijn, waarbij het aantal processen wordt geminimaliseerd, of ze kunnen ingewikkeld zijn, waarbij zoveel mogelijk relevante processen worden gemodelleerd. Dat gedrag van eenvoudige modellen kunnen we vaak begrijpen, maar dat van ingewikkelde modellen een stuk slechter. Nu zijn de modellen waar ons huidige klimaatbeleid op wordt gebaseerd van het type ingewikkeld. Het is soms zelfs zo dat we eenvoudige modellen nodig hebben om die ingewikkelde modellen te kunnen begrijpen (Brovkin et al. 1998, Brovkin et al. 2003). Het is bekend van het natuurlijk klimaatsysteem dat de mens de huidige toename van CO₂ in de atmosfeer veroorzaakt en het is bekend dat die toename leidt tot temperatuursverhoging door het broeikas effect. Daar hoeven we het niet meer over te hebben. Echter, het is niet bekend welke terugkoppelingsmechanismen

relevant zijn, op welke schaalniveaus, en wat het netto-effect is. Dus in welke mate de temperatuurstoename als gevolg van toename van CO₂ wordt versterkt of gedempt door terugkoppelingen is onbekend. Laat staan dat deze processen goed zijn gemodelleerd in de klimaatmodellen. Sterker nog, lang niet alle terugkoppelingsmechanismen zijn vertegenwoordigd in de klimaatmodellen (Rietkerk et al. 2011, De Boer et al. 2011). Onzeker is ook welke bijdrage andere menselijke invloeden hebben aan temperatuursveranderingen, zoals veranderend landgebruik (Pitman et al. 2009). Ook onbekend is de relatieve bijdrage van natuurlijke processen aan temperatuurfluctuaties, zoals natuurlijke oscillaties in oceaan temperatuur (Swanson en Tsonis 2009, Swanson et al. 2009). Dus een klimaatsdoelstelling dat de temperatuur niet boven de 2 graden mag stijgen in deze eeuw (en dat zou al kunnen worden bereikt in 2050) is echt een brug te ver. Alsof de mens het wereldwijde klimaat kan bepalen met een beleidsdoelstelling. Het gevaar van een dergelijke éézijdige doelstelling is dat de basis onder het klimaatsbeleid wegvalt indien blijkt dat de temperatuursveranderingen gaat divergeren ten opzichte van de voorspellingen van de modellen. Ook leidt dit type beleid ertoe dat een minister vragen uit de tweede kamer moet beantwoorden over het weer... Het zou wel toevallig zijn als het klimaat zich zou ontwikkelen zoals de modellen voorspellen, gezien het gebrek aan begrip van het klimaatsysteem.

Onzekerheid over klimaatseffecten mag echter nooit een reden zijn tot passiviteit, integendeel. Uit voorzorg en op basis van onze wetenschappelijke kennis zullen CO₂ doelstellingen moeten worden gesteld. Die klimaatmodellen zijn daarbij het beste gereedschap wat we tot nu toe hebben en zijn wetenschappelijk sterk in ontwikkeling. Maar we moeten ons milieubeleid niet richten op de huidige hockeystickvoorspellingen van temperatuurstoename, want reken maar dat de afrekening volgt, als de werkelijkheid weerbarstig blijkt. We moeten ons richten op al die andere hockeysticks die we wel in de hand hebben, zoals milieuvervuiling, gebruik van fossiele brandstoffen, vernietiging van leefgebied, verwoestijning en overbevinging. CO₂ uitstoot past ook in dit rijtje thuis.

Van Mavo leerling tot hoogleraar

Nu een persoonlijke noot. Ik had niet gedacht toen ik in 1978 aan de Marnix Mavo in Maassluis begon, dat ik het ooit nog eens zou schoppen tot hoogleraar

in Utrecht. En dat was heel lang ook niet mijn ambitie of bedoeling. Op de Mavo bleek dat ik de Havo wel aan zou kunnen en dat was dan ook de volgende stap. Wel natuurkunde in de vakantie bijgespijkerd. Na de Havo volgde de Hogere Bosbouw en Cultuurtechnische School; de huidige Internationale Agrarische Hogeschool Larenstein, nu onderdeel van WUR, waar ik Natuur en Landschap binnen de studierichting Cultuurtechniek volgde. Geweldige opleiding. Overigens had ik ook niet de intentie om de Hogere, maar de Middelbare Bosbouw en Cultuurtechnische School te gaan doen en daar had ik me dan ook voor aangemeld. Ik wilde later graag buiten in de natuur met mijn handen werken. Maar de selectiecommissie was wakker en heeft me overgehaald om de Hogere opleiding te doen, waarvoor overigens een strenge selectie was. Vervolgens heb ik 2 jaar bij het toenmalige ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij gewerkt, waarna ik me begon te vervelen en de interesse zich had ontwikkeld om een Master opleiding te gaan doen aan de toenmalige Landbouwniversiteit in Wageningen. Ik hoefde toen maar 1 formulier in te vullen, zoals ik het me herinner, en de studiefinanciering was weer geregeld. Wel wiskunde bijgespijkerd in de avonduren. Ik was vooral geïnteresseerd in de ecologie en heb mijn studie daarop aangepast. Na mijn Master opleiding ben ik vervolgens een PhD onderzoek gestart, wat aanvankelijk ook niet de bedoeling was, en waarvan ik het één en ander heb verteld. En hier sta ik dan.

Het politieke klimaat

Het mag duidelijk zijn dat serendipiteit ook in mijn studie- en academische loopbaan een belangrijke rol heeft gespeeld, ofwel cruciale toevalligheden op het juiste moment. Met dit verhaal wil ik ook pleiten voor de terugdringing van de tweedeling tussen het vmbo enerzijds en de havo-vwo anderzijds. Dus voor flexibiliteit in het onderwijssysteem, ook in het hoger onderwijs, waarbij de leerling of student gedurende de opleiding het onderwijstraject kan aanpassen afhankelijk van de capaciteit, interesse en ontwikkeling, en niet te maken krijgt met negatieve gevolgen van te vroeg gemaakte keuzes. Maar helaas lijkt het uitgangspunt voor beleid in het hoger onderwijs nu te zijn dat studenten elitaire uitvreter zijn ten koste van de hardwerkende belastingbetaler. En bij de forse bezuinigingen die het hoger onderwijs boven het hoofd hangt lijkt het uitgangspunt te zijn dat universitair onderzoek en onderwijs een

luxe is die we ons nauwelijks kunnen permitteren. Nu nog is de kwaliteit van het Nederlandse onderzoek en onderwijs hoog en soms zelfs van topniveau, ondanks langdurige bezuinigingen en toename van studentenaantallen. Ook voor het onderwijssysteem geldt dat het voortdurend en continue opvoeren van druk kan leiden tot kantelpunten. Willen we de kwaliteit van onderzoek en onderwijs hoog houden en zelfs verbeteren ten behoeve van toekomstige generaties dan zullen we juist moeten investeren. Blijvende bezuinigingen zullen uiteindelijk leiden tot kwaliteitsverlaging van onderzoek en onderwijs. Dus als het ambitieniveau hoog blijft moet er ook geld bij. En ik heb ook al een idee voor nuttige besteding. Wetenschappers kunnen daarmee bijvoorbeeld – naast de gangbare onderwijs- en onderzoekstijd – 5% van hun tijd verplicht ruimte geven aan serendipiteit, door spontane ingevingen te volgen, over de schutting van hun eigen vakgebied heen te kijken, en met elkaar te brainstormen. Soms blijkt dan achteraf dat een belangrijk stuk van een wetenschappelijke puzzel opgelost kan worden door een toevalligheid. Met mijn voorbeelden heb ik laten zien dat dit een *Science* en een *Nature* paper kan opleveren en meer dan een miljoen euro aan onderzoeksgeld.

Dames en heren studenten, jullie hebben nu de wind niet mee in vergelijking met andere tijden, zoals ik heb geschetst. En ik ben niet eens een babyboomer. Maar ik zou jullie willen zeggen: laat je niet dwingen tot negatieve keuzes, maar volg je interesse, werk aan je capaciteit en wees daarin zeer ambitieus. Geef ruimte aan serendipiteit door een open mind, nieuwsgierigheid, door te luisteren, of eens een vak te doen buiten je vakgebied. Maak gebruik van de knip tussen de Bachelor en Master opleidingen door eens iets anders te gaan doen of op reis te gaan. Als je het beste uit jezelf wil halen dan kan dat aan de Universiteit Utrecht en de Faculteit Geowetenschappen en ik zal er alles aan doen om dat zo te houden. Maar je moet er hard voor werken en geen kansen laten liggen. Jullie zijn in een zeer belangrijke fase van jullie ontwikkeling die je nu grotendeels zelf in de hand hebt en ik ben trots dat ik hierin een rol mag spelen.

Dankwoord

Ik kom aan het einde van mijn oratie en neem graag de gelegenheid voor het uitspreken van een woord van dank. Het bestuur van de UU en van de Faculteit Geowetenschappen in het bijzonder hebben het mogelijk

gemaakt dat ik nu deze oratie kan geven, waarvoor mijn welgemeende dank. Ik werk hier al weer bijna elf jaar, eerst als universitair docent, dan als universitair hoofddocent en nu dan sinds vorig jaar als hoogleraar. Zowel binnen de Sectie Milieunatuurwetenschappen, het Departement Innovatie en Milieuwetenschappen en de Faculteit Geowetenschappen heb ik altijd de ruimte gekregen om mijn onderzoekslijn te ontwikkelen. Ik voeg hierbij ook een persoonlijk woord van dank aan Martin Wassen, Bert van der Zwaan en Ronald van Kempen. Een speciale rol in mijn ontwikkeling als wetenschapper is vervuld door mijn promotoren Leo Stroosnijder en Herbert Prins en de voormalige leerstoelhouder van onze groep Milieunatuurwetenschappen Peter de Ruiter. Verder is wetenschap bij uitstek een vakgebied waarin wordt samengewerkt, met collega's, promovendi en postdocs. Zonder die samenwerking had ik hier nu niet gestaan. Ik heb mogen samenwerken met de ondertussen gepromoveerde Maaïke Bader, Sonia Kéfi en Maarten Eppinga. Dank jullie wel. Een persoonlijk woord van dank wil ik ook richten aan Yolanda Pueyo, Ruben Diaz Sierra, Angeles Garcia Mayor en Mara Baudena voor hun samenwerking als postdocs. Mijn naaste collega Stefan Dekker en ik vormen ook al heel lang een goed team. Tijdens mijn promotie ben ik al gaan samenwerken met Johan van de Koppel, nu bij het NIOO, en die samenwerking is gaande tot op heden. Ik waardeer ook zeer al mijn naaste collega's bij Milieunatuurwetenschappen: Aat Barendregt, Margien Bootsma, Stefan Dekker, Jerry van Dijk, Maarten Eppinga, Wilma Peeters, Karin Rebel, Paul Schot, Martin Wassen en de huidige promovendi Hugo de Boer, Brian Dermody, Hester Soomers, Mart Verwijmeren. Één van de leuke dingen van het houden van een oratie is dat je ook je vrienden en familie in één keer hebt verteld waar je mee bezig bent, naar ik hoop op een begrijpelijke manier. Vader Kees, geweldig dat u erbij kan zijn. Dank dat u er bent. Ida heeft het helaas niet gehaald en is in onze gedachten. Dank ook aan Marja, die vandaag zo trots is als een pauw. Ik dank ook mijn broers en zussen en hun partners en de andere familieleden die hier aanwezig zijn. Van mijn vrienden wil ik Peter noemen die er altijd voor me is. Tot slot, Isabel, dank voor je liefde en vreugde die je me dagelijks geeft.

Ik heb gezegd.

Ik wil graag Isabel Silva, Martin Wassen, Maarten Eppinga en Peter Driessen bedanken voor het kritisch doornemen van deze rede en het geven van suggesties. Mijn dank gaat ook uit naar Sonia Kéfi voor het maken van Figuur 5 en naar Ton Markus en Margot Stoete voor professionele tekst- en figuuroopmaak.

Literatuur

- Brovkin, V., M. Claussen, V. Petoukhov en A. Ganopolski. 1998. On the stability of the atmosphere-vegetation system in the Sahara/Sahel region. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 103: 31613-31624.
- Brovkin, V., S. Levis, M.F. Loutre, M. Crucifix, M. Claussen, A. Ganopolski, C. Kubatzki en V. Petoukhov. 2003. Stability analysis of the climate-vegetation system in the northern high latitudes. *Climate Change* 57: 119-138.
- Castets, V., E. Dulos, J. Boissenade en P. de Kepper. 1990. Experimental evidence of a sustained standing Turing-type nonequilibrium chemical pattern. *Physical Review Letters* 64: 2953-2956.
- Claussen, M. 1997. Modeling bio-geophysical feedback in the African and Indian monsoon region. *Climate Dynamics* 13: 247-257.
- Deblauwe, V., N. Barbier, P. Couteron, O. Lejeune en Jan Bogaert. 2008. The global biogeography of semi-arid periodic vegetation patterns. *Global Ecology and Biogeography* 17: 715-723.
- de Boer, H.J., Lammertsma, E.I., Wagner-Cremer, F., Wassen, M.J., Dilcher, D.L., Dekker, S.C. 2011. Climate forcing due to optimization of maximal leaf conductance in subtropical vegetation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, doi/10.1073/pnas.1100555108
- Dekker, S., M. Rietkerk en M.F.P. Bierkens. 2007. Coupling microscale vegetation-soil water and macroscale vegetation-precipitation feedbacks in semiarid ecosystems. *Global Change Biology* 13: 671-678.
- Descharnes, R. and G. Néret. 2001. Salvador Dalí 1904-1989. Het geschilderde werk. Taschen, Köln.
- Eppinga, M.B. 2009. Amazing pattern: spatial self-organization in peatlands. Proefschrift Universiteit Utrecht.
- Kéfi, S., M. Rietkerk, C.L. Alados, Y. Pueyo, V.P. Papanastasis, A. ElAich en P.C. de Ruiter. 2007. Spatial vegetation patterns and imminent desertification in Mediterranean arid ecosystems. *Nature* 449: 213-217.
- Kéfi, S., M. Rietkerk, M. Roy, A. Franc, P.C. de Ruiter en M. Pascual. 2011. Robust scaling in ecosystems and the meltdown of patch size distributions before extinction. *Ecology Letters* 14: 29-35.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Desertification Synthesis*. World Resources Institute, Washington, DC.

- Pitman, A.J. et al. 2009. Uncertainties in climate responses to past land cover change: First results from the LUCID intercomparison study. *Geophysical Research Letters* 36m L14814.
- Rietkerk, M., M.C. Boerlijst, F. van Langevelde, R. HillerisLammers, J. van de Koppel, L. Kumar, H.H.T. Prins en Andre de Roos. 2002. Self-organization of vegetation in arid ecosystems. *The American Naturalist* 160: 524-530.
- Rietkerk, M., S.C. Dekker, P.C. de Ruiter en J. van de Koppel. 2004. Self-organized patchiness and catastrophic shifts in ecosystems. *Science* 305: 1926-1929.
- Rietkerk, M., P. Ketner, L. Stroosnijder en H.H.T. Prins. 1996. Sahelian rangeland development; a catastrophe? *Journal of Range Management* 49: 512-519.
- Rietkerk, M., F. van den Bosch en J. van de Koppel. 1997. Site-specific properties and irreversible vegetation changes in semi-arid grazing systems. *Oikos* 80: 241-252.
- Rietkerk, M. en J. van de Koppel. 1997. Alternate stable states and threshold effects in semi-arid ecosystems. *Oikos* 79: 69-76.
- Rietkerk, M. en J. van de Koppel. 2008. Regular pattern formation in real ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution* 23: 169-175.
- Rietkerk, M., V. Brovkin, P.M. van Bodegom, M. Claussen, S.C. Dekker, H.A. Dijkstra, S.Y. Goryachkin, P. Kabat, E.H. van Nes, A.-M. Neutel, S.E. Nicholson, C. Nobre, V. Petoukhov, A. Provenzake, M. Scheffer en S. Seneviradne. 2011. Local ecosystem feedbacks and critical transitions in the climate. *Ecological Complexity*. In press.
- Solé, R. 2007. Scaling laws in the drier. *Nature* 449: 151-153.
- Swanson, K.L. en A.A. Tsonis. 2009. Has the climate recently shifted? *Geophysical Research Letters* 36, L06711.
- Swanson, K.L., G. Sugihara en A.A. Tsonis. 2009. Long-term variability and 20th century climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106: 16120-16123.
- Van de Koppel, J., M. Rietkerk en F.J. Weissing. 1997. Catastrophic vegetation shifts and soil degradation in terrestrial grazing systems. *Trends in Ecology and Evolution* 12: 352-356.
- Scheffer, M., J. Bascompte, W.A. Brock, V. Brovkin, S.R. Carpenter, V. Dakos, H. Held, E.H. van Nes, M. Rietkerk en G. Sugihara. 2009. Early-warning signals for critical transitions. *Nature* 461: 53-59.

- Thom, R. 1975. Structural stability and morphogenesis: an outline of a general theory of models. Benjamin Cummings, Reading, Mass.
- Turing, A.M. 1952. The chemical basis of morphogenesis. Philosophical Transactions of The Royal Society of London, series B 237: 37-72.
- Vitousek, P.M., H.A. Mooney, J. Lubchenco en J.M. Melillo. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. Science 277: 494-499.