

# Kantelende evenwichten

## Over het gedrag van complexe systemen

Een dynamisch systeem – bijvoorbeeld een ecosysteem, een samenleving, de aarde of het heelal – verkeert normaliter in evenwicht. Er zijn echter ook omslagpunten waarop dat evenwicht kan worden verbroken. Wat gebeurt er met een systeem als zo'n omslagpunt wordt bereikt? En kan zo iets worden voorkomen? **door Paul C. Struik**

# H

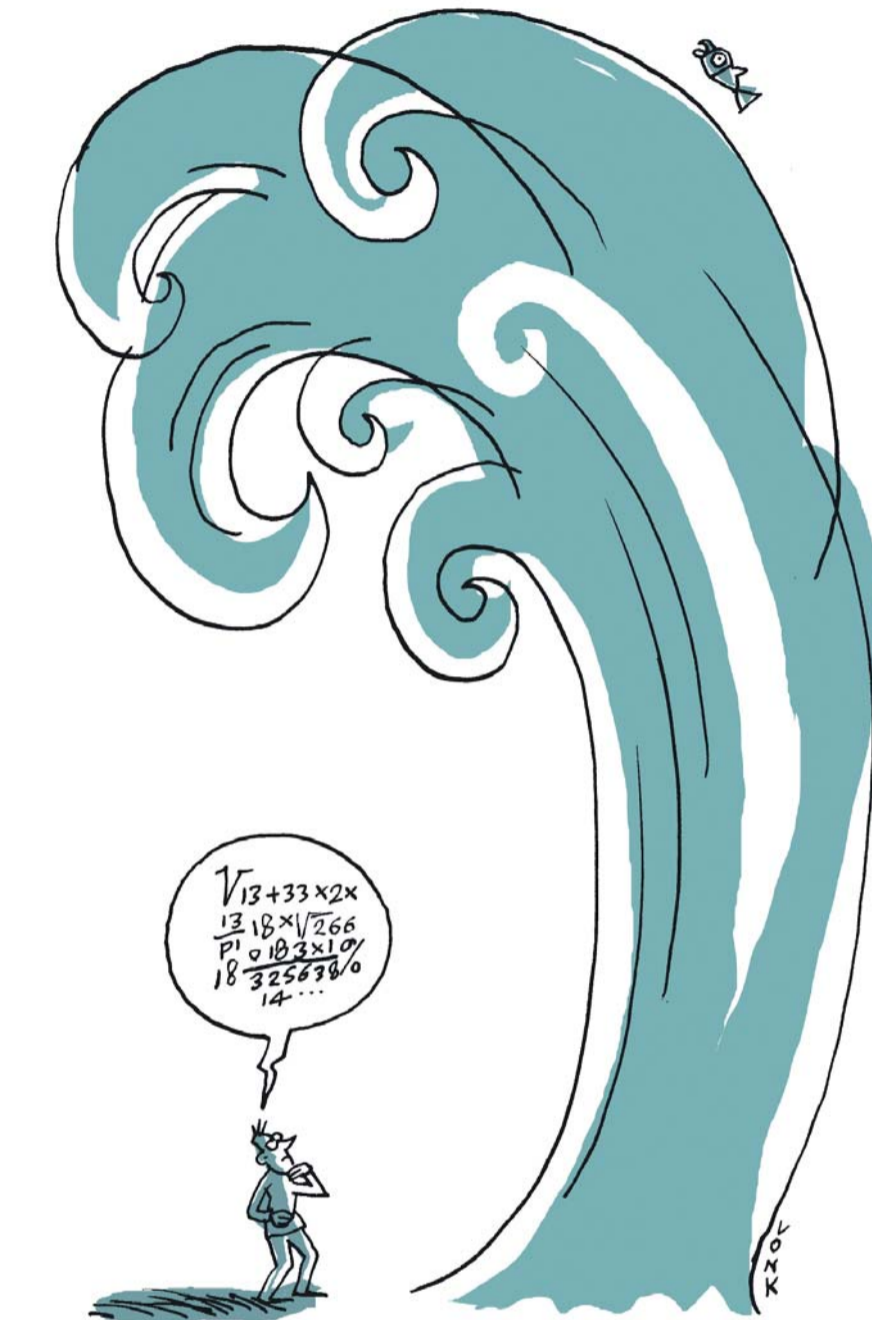
ET

leven op aarde speelt zich af in continue kringlopen die ecosystemen in evenwicht houden en voortdrijven. Wij mensen stappen als individuen tijdelijk op een levend, cyclisch systeem van geboorte, leven en dood, van ontstaan, groei en afbraak. We voelen ons een kleine schakel die het systeem als geheel mede in stand helpt te houden, ook al zijn we slechts passanten die even meebewegen in een eeuwigdurende cyclus en is daarvoor onze individuele bijdrage per definitie minuscuul. Velen voelen zich getroost en gesterkt door het besef onderdeel te zijn van dit continuüm en ontleneren er hun zingeving aan. In de Disney-productie *The Lion King* wordt de 'Circle of Life' zelfs tot moralistische apotheose van het verhaal verheven.

Helaas kan een dergelijke cyclus op beperkte schaal en in gelukkig vooralsnog zeldzame gevallen abrupt worden doorbroken, door een combinatie van intrinsieke processen en invloed van buitenaf. Het gevolg is dat ten minste een deel van het systeem plotsklaps ineenstort en zijn continuïteit en bestendigheid verliest. Een dergelijke ineenstorting is vrijwel onomkeerbaar.

De vrees is dat dit ook met het systeem Aarde kan gebeuren. Dat zou dan het einde van onze beschaving en onze soort kunnen betekenen. De wetenschap ontdekt met een zekere regelmaat grote veranderingen in onze omgeving en komt dan al extrapolierend uit op mogelijke rampscenario's. Van blijvende hongersnood door overbevolking, via stervende wouden door zure regen en massale sterfte door aantasting van de ozonlaag, tot droogte en hitte als gevolg van door menselijke activiteiten veroorzaakte klimaatveranderingen. Als dergelijke veranderingen geleidelijk gaan en je ze duidelijk kunt zien aankomen, is er meestal nog tijd om het tij te keren, maar als de veranderingen sluipend zijn en leiden tot een plotseling en onvoorzien omslagpunt, lijken we gedoemd toe te kijken en er het beste van te hopen. We zien kritieke transities (ook wel aangeduid als regiemverschuivingen) om ons heen, verbazen ons erover, zijn opgelucht dat ze zelden voorkomen, kunnen ze niet verklaren, maar snappen intussen wel dat ze ons onaangenaam kunnen treffen.

Over dit thema handelt Marten Scheffers boeiende boek *Critical Transitions in Nature and Society*. Het is een belangwekkend boek dat een geheel eigen licht werpt op rampentheorieën, chaos, kritische transities en veerkracht. Het onderwerp is Scheffer wel toevertrouwd. Hij is de huisruddiet van Wageningen Universiteit, een multi-talent, een generalist en



Tekening: Berend Vonk.

holist *pur sang*. Zijn bijdrage aan het wetenschapsgebied aquatische ecologie, met bijzondere aandacht voor plotselinge veranderingen in ondiepe meren, leverde hem de Spinozapremie op, maar hij is een generalist die zijn theorieën graag uitprobeert op niet-natuurlijke systemen zoals humane samenlevingen. Hij wil met dit boek dan ook een bijdrage leveren aan de consiliëntie van het gedrag van complexe systemen.

Het boek van Scheffer heeft vier delen. In het eerste deel behandelt hij de theorie van dynamische systemen en kritische transities. Dit deel leest zeer plezierig voor lezers die genoeg beleven aan abstract denken, maar niet willen worden oververmoeid met de achterliggende ingewikkelde wiskunde.

Het tweede deel behandelt een groot aantal, tot in detail uitgewerkte *case stu-*

*dies* uit zeer diverse domeinen, van ondiepe meren naar terrestrische ecosystemen en maatschappijen in crisis. Het laat zien dat het ineenstorten van heel verschillende systemen aan vergelijkbare wetmatigheden voldoet, of ze nu natuurlijk zijn of door de mens gevormd. Als het boek iets later zou zijn geschreven zou ongetwijfeld ook de dominorevolutie in de Arabische wereld als *case* opgenomen zijn. Dit tweede deel kan voor veel lezers ook het vertrekpunt zijn; het kan ook los van de andere delen gelezen worden.

Het derde deel bevat de toepassing: het behandelt de vraag wat we nu aan de nieuwe inzichten hebben. Hoe kunnen we weten of een systeem ook een alternatieve toestand heeft, hoe kunnen we weten of we een omslagpunt naderen en kunnen we het systeem zodanig beïnvloeden dat het niet tot een ongewenste

CRITICAL TRANSITIONS IN NATURE AND SOCIETY (PRINCETON STUDIES IN COMPLEXITY)

Door Marten Scheffer.

Princeton University Press.

Princeton, NJ 2009. 384 pag. € 44,95

GEO-ENGINEERING CLIMATE CHANGE. ENVIRONMENTAL NECESSITY OR PANDORA'S BOX?

Door Brian Launder en

J. Michael T. Thompson (red.).

Cambridge University Press.

Cambridge 2010. 314 pag. € 99,95

COLLECTIVE ANIMAL BEHAVIOR

Door David J.T. Sumpter.

Princeton University Press.

Princeton, NJ 2010. 302 pag. € 37,95

omslag of juist wel tot een gewenste omslag komt? Dat is des te moeilijker omdat vooral in door de mens beïnvloede systemen het optimale rendement daarvan het systeem vaak gevaarlijk dicht in de buurt van een negatief omslagpunt brengt.

Het vierde deel is een appendix met de wiskundige uitwerkingen van de theorieën uit het eerste deel. Het geeft een soort *crash course* over modelleren van dynamische systemen. Hoewel de auteur hier uitsluitend put uit zijn kennis betreffende aquatische ecologie, is het appendix zeer transparant en toegankelijk. Zelf heb ik eerst het appendix en toen pas het eerste deel gelezen en die strategie heeft zonder meer bijgedragen aan het genoegen dat ik aan het boek beleefd heb.

Scheffers boek gaat dus over omslagpunten in dynamische systemen. Dynamische systemen kunnen van alles zijn, van een cel of een reageerbuis tot een ecosysteem, de aarde of het heelal. Deze dynamische systemen verkeren normaliter in een toestand van evenwicht. Als het evenwicht stabiel is, zal elke (kleine) verandering gewoonlijk leiden tot een terugkeer naar de oorspronkelijke toestand. Een systeem heeft echter vaak meerdere evenwichten en kan plotseling

**'Wij mensen stappen als individuen tijdelijk op een levend, cyclisch systeem van geboorte, leven en dood, van ontstaan, groei en afbraak.'**

van het ene evenwicht naar het andere omslaan als drempelwaarden worden onder- of overschreden. Als het om een extreme omslag in de toestand van het systeem gaat, is er sprake van een kritieke transitie. Een dergelijke kritieke transitie is gerelateerd aan de nabijheid van een bifurcatie, een punt waarop de onder-

---

**‘Velen voelen zich getroost en gesterkt door het besef onderdeel te zijn van dit continuüm en ontlenen er hun zingeving aan.’**

liggende aantrekkers (waar het dynamische systeem naartoe evolueert) of afstoters (waar het dynamische systeem vanaf beweegt) kwalitatief veranderen. Vanwege het bestaan van meerdere evenwichten kan een kleine verandering dus uiteindelijk leiden tot een catastrofe. Immers, een systeem op de grens van zijn veerkracht kan door een kleine invloed uit balans raken en overgaan tot een nieuwe evenwichtstoestand waar het niet zonder sterke invloed van buitenaf uitkomt. De terugkeer naar het oorspronkelijke evenwicht vindt alleen plaats als de omstandigheden weer sterk veranderen, sterker dan tot het punt waarop de eerdere omslag plaatsvond. Dit verschijn-

sel wordt *hysterese* genoemd en is van groot belang bij het herstellen van natuurwaarden of het herintroduceren van lokaal uitgestorven soorten. Het terugdraaien van een catastrofe is nog niet zo eenvoudig.

Meestal gaat het echter goed met de systemen om ons heen. Ze hebben namelijk een vorm van veerkracht. Het boek hanteert maar liefst vier definities van veerkracht. Deze zijn kortweg:

1. het vermogen van een systeem om na een verstoring te herstellen;
2. de snelheid waarmee een systeem na verstoring terugkeert naar de oorspronkelijke toestand;
3. de mate van verstoring die een systeem aankan voordat het tot een andere toestand vervalt;
4. het vermogen van een systeem om verstoring op te vangen en zich gedurende een verandering te reorganiseren zodat ten minste ongeveer dezelfde functie, structuur, identiteit en *feedbacks* gehandhaafd kunnen blijven.

De laatste definitie geeft aan dat een systeem bijna nooit helemaal in zijn oude toestand terugkeert. Dat geldt vooral voor sociale systemen: er is altijd wel iets blijvend veranderd.

Kleine of geleidelijke veranderingen hoeven het systeem dus niet direct te veranderen, maar ze kunnen wel zijn veerkracht verkleinen en dus het systeem dichter bij een omslagpunt brengen, bijvoorbeeld bij een geleidelijke toename van begrazingsdruk in de Sahel. Veran-

deringen in veerkracht kunnen eenvoudiger worden waargenomen en beheerst dan toevallige, grote verstoringen die het systeem uit evenwicht brengen, zoals een langdurige droogte. Dergelijke veranderingen in veerkracht zijn daarom van groot belang. Bifurcatiepunten laten zich niet op basis van algemene wetmatigheden beschrijven; de drempelwaarden waarbij de omslag plaatsvindt, zijn niet constant en de mate van hysteresis is dat ook niet. Bovendien: externe factoren zijn dan wel vaak de *trigger* die een omslag teweegbrengt (droogte), maar minstens even vaak vormt een geleidelijk proces van verandering (toename begrazingsdruk) de achterliggende oorzaak. Daarom is de toenemende ecologische voetafdruk van de mens zo'n zorgwekkende ontwikkeling: we weten niet wanneer we drempelwaarden gaan overschrijden.

verstoringen. Het systeem kan bovendien steeds meer autocorrelatie gaan vertonen (dat wil zeggen dat de toestand van het systeem steeds meer gaat lijken op de vorige toestand), meer ruimtelijke samenhang (sterkere onderlinge beïnvloeding van ruimtelijk gescheiden onderdelen van het systeem) of meer variantie (een grotere spreiding in de fluctuaties van de toestand van het systeem).

Zelfs een evenwichtige exploitatie van systemen door de mens tot het punt van het maximale maatschappelijke nut brengt systemen tot vlakbij een omslagpunt. Voor een goed beheer van dergelijke systemen is het nodig te weten hoe exploitatie mogelijk blijft zonder het systeem te laten omslaan. Een kleine misrekening kan hier desastreuze gevolgen hebben. Er ligt bovendien een wereld van verschil tussen praktijk en theorie, zoals de *tragedy of the commons* ons al heeft geleerd: het benutten van gemeenschappelijke hulpbronnen leidt vaak tot overexploitatie omdat elke gebruiker in de concurrentie met de andere gebruikers het eigen belang op de korte termijn laat prevaleren boven het algemene belang, en boven het eigen belang op de lange termijn.

Gelukkig zijn er voorbeelden van (drastische) ingrepen met een min of meer blijvend positief effect in systemen die al waren omgeslagen. Het bekendste voorbeeld uit de ecologie is biomanipulatie van meren. Door het wegvangen van een deel van de aanwezige vispopulatie kon het water van deze meren weer blijvend helder worden gemaakt. Een voorbeeld uit de maatschappijwetenschappen is het verstrekken van microkredieten om de allerarmsten uit de armoedeval te halen, al werkt dit slechts in bepaalde gevallen. Voorbeelden van geslaagde en tijdige pogingen om een omslagpunt niet te bereiken zijn er ook. Laten we hopen dat de mens er ook in zal slagen het voorspelde omslagpunt niet te bereiken vanwaar wereldwijde klimaatsveranderingen oncontroleerbaar snel zullen verlopen.

Het laatste aspect brengt ons direct bij een tweede boek: *Geo-Engineering Climate Change. Environmental Necessity or Pandora's Box?*, in 2010 verschenen onder redactie van Brian Launder en J. Michael

---

## **‘Als de veranderingen sluipend zijn en leiden tot een plotseling en onvoorzien omslagpunt, lijken we gedoemd toe te kijken en er het beste van te hopen.’**

Tot zover is het verhaal redelijk goed te volgen, maar de werkelijkheid is toch nog ingewikkelder. Scheffer laat zien dat dynamische systemen niet altijd naar een evenwicht of stabiele toestand tenderen; er kan ook sprake zijn van een stabiele cyclus of een andersoortige dynamische situatie. Juist die eigen dynamiek kan een extra risicofactor vormen. Een dynamisch systeem kan zichzelf door zijn eigen cyclus dicht bij een omslagpunt brengen en als cyclus en versturende factor op een kritiek punt bijeenkomen, kan het systeem zich mede door zijn eigen dynamiek over het randje storten. Voedselketens bestaande uit organismen die alle een cyclisch patroon van dichtheid vertonen, zijn hiervan een mooi voorbeeld. Patronen kunnen daarbij aan de waarneming onttrokken worden door ingewikkelde spatiale en temporele variaties, fluctuaties, heterogeniteit, diversiteit en andere bronnen van variatie. Modelleren is dan vaak een belangrijk onderzoeksinstrument.

Scheffers boek leert ons dat we niet alleen naar de details moeten kijken, maar juist naar de grote patronen. Geen beschaving of samenleving is veilig voor catastrofes veroorzaakt door kritische transitie, maar deze zijn wel degelijk te voorspellen op basis van dominante, waarneembare veranderingen, als we de tekenen aan de wand maar willen zien en de waarschuwingssignalen willen oppikken. En als we ze kunnen voorspellen, kunnen we ze wellicht ook voorkomen.

Systemen in de buurt van een omslagpunt herstellen vaak trager van verstoringen. Experimenteel is dit aan te tonen door het systeem bloot te stellen aan kleine, op zichzelf tamelijk onschuldige

---

## **‘Daarom is de toenemende ecologische voetafdruk van de mens zo'n zorgwekkende ontwikkeling: we weten niet wanneer we drempelwaarden gaan overschrijden.’**

T. Thompson. Dit boek gaat over omslagpunten in de klimaatsveranderingen en mogelijke technologische oplossingen om te voorkomen dat we dergelijke kritieke transitie bereiken.

Zoals al uit Scheffers boek bleek, is het maar zeer de vraag of we het probleem van klimaatsveranderingen nog wel kun-

nen aanpakken, maar stel dat dit nog mogelijk is: hebben we dan de technieken in huis om het tij te keren? Het boek van Launder en Thompson beschrijft een aantal mogelijkheden. Het gaat veelal om gewaagde en futuristisch aandoende oplossingen om *global change* te vertragen. Ze lopen uiteen van het plaatsen van spiegels in de ruimte om minder straling op aarde te laten neerkomen, via het plaatsen van rondboberende reflectoren op de oceanen om het binnenkomende licht weer te reflecteren, tot het bemesten van de oceanen om op die manier meer kool-dioxide in plantaardig materiaal vast te leggen. Alle oplossingen hebben twee dingen gemeen: ze zijn kostbaar en hun effecten zijn onvoorspelbaar. Bij de evaluatie van alle mogelijkheden wordt wel snel duidelijk dat ook hier geldt: voor-komen is beter dan genezen.

De voorbeelden van *geo-engineering* die in het boek worden behandeld geven wel aan dat er ten minste vier grote uitdagingen zijn als we het klimaatprobleem op deze manier internationaal willen aanpakken. Allereerst gaat het om ontwikkelingen op ongekend grote schaal, die veel onderzoek, veel geld en technologische hoogstandjes zullen vereisen. Maar dat acht ik nog niet eens het grootste probleem. De tweede uitdaging is dat we hier lijken te gaan experimenteren met een systeem waar we er maar één van hebben. Het opmaken van de balans van positieve en negatieve effecten van dergelijke ingewikkelde ingrepen op het systeem Aarde is niet eenvoudig. Het boek van Scheffer leert ons bovendien dat positieve effec-

ten ook tijdelijk kunnen zijn en dat het systeem weer (deels) terug kan vallen in zijn ongewenste toestand. Er is geen ruimte voor mislukking en het vaststellen van het moment waarop iets onomkeerbaars proberen minder risicovol is dan niets doen, lijkt een hachelijke onderneming. Ten derde vereist het vinden van voldoende fondsen voor sommige van deze oplossingen internationale samenwerking van een ongekeerde omvang. Ten vierde zal het realiseren van consensus over het hoe en wanneer een enorme politieke inspanning vragen.

Genoemde uitdagingen stellen grote eisen aan collectiviteit, synchronie en solidariteit op wereldschaal. Een eerste vereiste bij het voorkómen van een kritieke transitie in het klimaat van onze planeet is een goede synchronisatie van de bewustwording, tijdige en breed gedragen daadkracht van het collectief, en een goede besluitvorming over de beste keuze. Hoe ingewikkeld collectief gedrag van mens en dier is en hoe moeilijk het is om synchronie en afstemming te bewerkstelligen, wordt fraai geïllustreerd in het boek *Collective Animal Behavior* van David J.T. Sumpter.

Het boek vereist interesse in wiskundige modellen, maar de verhalen achter de modellen zijn prachtig. Het geeft antwoord op interessante vragen, zoals waarom samenzijn voor dieren nut kan hebben, wat de optimale groeps-grootte is, en waarom de optimale groeps-grootte meestal kleiner is dan de meest stabiele groeps-grootte. Door de aanwezigheid van

hulpbronnen op specifieke plekken kan groepsvorming voordeel hebben, omdat je met velen immers een grotere kans hebt om die plekken te vinden. Maar dan moet je je kennis wel met anderen delen.

In deze context zijn synchronisatie, informatieoverdracht en gezamenlijke besluitvorming belangrijk. Een groot

---

**‘Het is maar zeer de vraag of we het probleem van klimaatsveranderingen nog wel kunnen aanpakken, maar stel dat dit nog mogelijk is: hebben we dan de technieken in huis om het tij te keren?’**

publiek blijkt na een voorstelling aanvankelijk geheel asynchroon te applaudiseren, om vervolgens geleidelijk steeds meer in de pas te gaan lopen totdat het aan het eind weer een asynchroon rommeltje wordt. Sumpter beschrijft en analyseert dit fenomeen niet alleen, hij kan het ook modelleren. Informatievoorziening blijkt een dominant aspect te zijn van groepsvorming in de dierenwereld, maar heldere informatieoverdracht is eveneens nodig en daar schort het nog wel eens aan. De bijendans mag dan een

heel ingenieuze manier lijken om een vindplaats van nectar aan te duiden, de aldus geïnformeerde collegae komen vaak onverrichterzake terug naar de korf en juist dat terugkomen blijkt dan weer een belangrijke communicatieve functie te hebben. Sumpter analyseert ook haar-scherp hoe ingewikkeld het is om samen een goed besluit te nemen in groepen van onafhankelijke individuen. De groep ontleent zijn wijsheid aan het feit dat de individuen weliswaar onafhankelijk denken, maar tegelijk via positieve terugkoppeling geneigd zijn om de goede voorbeelden te volgen en de slechte voorbeelden af te wijzen. Maar om dat proces te laten plaatsvinden moeten er slechte voorbeelden zijn. En als te veel individuen een foute keuze hebben gemaakt, zal de meerderheid voor de slechte oplossing kiezen.

Scheffer is in zijn boek gematigd optimistisch over de mogelijkheid kritische transities te voorkomen. Maar het boek over *geo-engineering* doet je de schrik om het hart slaan. Erg geruststellend over ons collectief vermogen om goede beslissingen te nemen is het boek van Sumpter bovendien ook niet. We moeten kennelijk veel dingen samen fout doen om kritische transities te voorkomen, terwijl we voor het redden van de wereld wellicht maar één kans hebben om te slagen. God hebbe onze zielen.

Paul C. Struik is hoogleraar gewasfysiologie en leidt het Centrum voor Gewassysteemanalyse van Wageningen Universiteit.