Hoe biologische systemen omgaan met stress

Veerkracht

BIOWETENSCHAPPEN EN MAATSCHAPPIJ
KWARTAAL 1 2022

Cahier 1 | 2022 | 41e jaargang

Veerkracht

Dit cahier is een uitgave van Stichting Biowetenschappen en Maatschappij (BWM) en verschijnt twee maal per jaar. Elk nummer is geheel gewijd aan een thema uit de levenswetenschappen, speciaal met het oog op de maatschappelijke gevolgen ervan.

Stichting BWM is ondergebracht bij ZonMw.

BESTUUR
Prof. dr. J.W.F. Reumer (voorzitter)
Dr. R. Grootens-Wiegers (penningmeester)
Dr. M. Bosse
Prof. dr. E. van Donk
Dr. R.H.J. Erkens
Prof. dr. W.A. van Gool
Prof. dr. B.C.J. Hamel
Dr. E.J.O. Kompanje
Dr. S.M. Chuva de Sousa Lopes
Dr. J.E. van Steenbergen

RAAD VAN ADVIES
Prof. dr. J. van den Broek
Dr. L.K. Defize
Prof. dr. J. van Dissel
Dr. J.J.E. van Everdingen
Prof. dr. J.P.M. Geraedts
Prof. dr. ir. F.P.M. Govers
Prof. dr. W.P.M. Hoekstra
Prof. dr. J.A. Knottnerus
Prof. dr. E. Schroten

REDACTIECOMMISSIE
Dr. A. de Deugd
Prof. dr. E. van Donk
Dr. R.H.J. Erkens
Dr. M. Sterk

REDACTIE
ir. A.Smit

BUREAU
Joy Kerklaan
Monique Verheij

BEELDREDACTIE
B en U international picture service, Amsterdam

INFOGRAPHICS
Prof. dr. Jos van den Broek

VORMGEVING
Studio Bassa, Culemborg

DRUK
Drukwerkconsultancy

INFORMATIE, ABONNEMENTEN EN BESTELLEN LOSSE NUMMERS
Stichting Biowetenschappen en Maatschappij
Laan van Nieuw Oost-Indië 334
2593 CE Den Haag
telefoon: 070-34 95 402
e-mail:
info@biomaatschappij.nl
www.biomaatschappij.nl

© Stichting BWM
ISBN/EAN 978-94-93232-04-4

Stichting BWM heeft zich ingespannen om alle rechthebbenden van de illustraties in deze uitgave te achterhalen. Mocht u desondanks menen rechten te kunnen laten gelden, dan verzoeken wij u vriendelijk om contact met ons op te nemen.

FSC
www.fsc.org
MIX
Paper from responsible sources
FSC® C106236

bio wetenschap+ maatschappij

Inhoud

Voorwoord 2
Inleiding 4

1 Veerkrachtige cellen 6

Immuuncellen passen zich aan 7
Het immuunsysteem heeft baat bij microorganismen 10
Persoonsgerichte therapie moet kankercellen eronder krijgen 14
Planten en hun cellen: meesters in omgaan met stress 16
BOX De juiste set eiwitten op het juiste moment 20

2 Hoe organismen zich aanpassen 22

Waarom een schimmel niet kieskeurig hoeft te zijn 23
Planten zijn flexibel 26
Fokprogramma kan veerkracht veestapel vergroten 29
Planten doen aan risicospreiding 33
BOX Moleculaire verdediging in kaart gebracht 36

3 Leven in een sterk veranderende omgeving 38

Koralen onder druk 39
Meer verliezers dan winnaars 42
We kunnen onszelf nog veerkrachtiger maken 45
De plastische hersenen 49
BOX Het herstellend vermogen van de mens precies gemeten 52

4 Kantelpunten in klimaat- en ecosystemen 54

Opwarming kan kettingreactie klimaatveranderingen veroorzaken 55
Bos behoudt regen, regen behoudt bos 58
Natuur in stad past zich snel aan 60
KADER Dagboek van een stadsjungle-bewoner 62
Onverwachte veerkracht door ruimtelijke patronen 64
BOX Patroon en hersteltijd geven veerkracht ecosystemen aan 68
Epiloog: Veerkracht geeft hoop 70

Auteurs 74
Meer informatie 75
Illustratieverantwoording 76

Voorwoord

Veerkracht is het fenomeen dat een systeem onder druk verandert, maar kan 'terugveren' of zich kan aanpassen aan de nieuwe omstandigheden. Veerkracht speelt een rol op vele terreinen en de mate waarin een systeem veerkracht heeft, hangt vaak direct samen met diversiteit. Als belegger heb je een grotere kans om een goed rendement te halen als je een breed portfolio van aandelen hebt en dus op meerdere paarden wedt. Ondanks dat iemand die alles heeft belegd in het snelst stijgende aandeel, dus achteraf op het best paard heeft gewed, altijd de grootste winst behaalt. Een monocultuur van gewassen levert vaak meer oogst op dan een gemengde cultuur, maar zorgt ook voor meer risico's. Plagen en ziekten kunnen er gemakkelijker schade aanrichten. In een monocultuur zijn dus veel bestrijdingsmiddelen nodig, het is alles of niets. De transitie die de maatschappij van de landbouw verwacht, komt in de basis neer op het vertrouwen in de veerkracht van gewassen en hun omgeving en het lef om de natuur als partner in te zetten in plaats van als vijand te zien.

Er zijn verschillende plekken waar al lang wetenschappelijk werk wordt verricht aan veerkracht. Het Zweedse Stockholm Resilience Institute staat voorop in dit onderzoek en heeft zeven principes van veerkracht opgesteld. Een aantal is zeer relevant voor ecologische maar ook voor andere biologische systemen zoals cellen en organismen. Zo zorgt diversiteit voor veerkracht, hier boven al aangegeven. Een ecologisch netwerk met veel soorten die ook nog deels overlappen in hun functies, heeft meer veerkracht dan een netwerk dat maar uit een paar soorten bestaat. In een divers ecologisch systeem kunnen er soorten uitvallen, zonder dat er essentiële functies verdwijnen.

Meerdere verbindingen in een netwerk zorgen ook voor een hogere veerkracht. Dan zijn er snel alternatieve routes te vinden als een deel uitvalt. Denk bijvoorbeeld aan onze hersenen die snel nieuwe verbindingen kunnen activeren om onze lichaamsfuncties te herstellen na een herseninfarct. Daarnaast is het goed als biologische systemen snelle en langzame reacties voorhanden hebben op verandering. Denk bijvoorbeeld aan een honingbijenvolk dat aangevallen wordt door een beer. Als alle bijen als een gek naar buiten zouden vliegen om de beer aan te pakken dan zou dat enorm veel energie en tijd kosten. Een bijenvolk bestaan uit groepen werksters die genetisch anders zijn en daardoor verschillen in de snelheid van hun reactie op gevaar. Een klein deel van de werksters reageert snel op een verstoring en gaat op onderzoek uit. Als er echt een bedreiging is zoals de beer, steken ze de belager, leggen het loodje en scheiden een alarmstof uit zodat de anderen ook in actie komen. Is er echter vals alarm, dan blijft de rest van het bijenvolk op haar plek waardoor er geen energie wordt verspild. De snelle en langzamere reacties leveren dus een optimale combinatie en houden het honingbijenvolk veerkrachtig.

De andere principes van veerkracht hebben meer te maken met wat er aan de menselijke kant nodig is om complexe problemen aan te vliegen en veerkrachtige systemen te ontwerpen. Zo is het belangrijk meerdere partijen en belanghebbenden te betrekken bij het probleem, kennis over com-

Koos Biesmeijer

plexe systemen te ontwikkelen, te blijven leren en goed na te denken over de organisatieprincipes die nodig zijn om het probleem op te lossen. Een goed voorbeeld is het Deltaplan Biodiversiteitherstel waarin inmiddels meer dan honderd organisaties met het mantra 'doen, leren, beter doen' pogen de biodiversiteit in Nederland te versterken. Al deze organisaties realiseren zich dat ze onderdeel zijn van een complex steeds veranderend systeem waarin ze slechts een kleine rol spelen. Ze hebben input van en verbinding met anderen nodig om zichzelf zo aan te kunnen passen dat ze als organisatie voldoende veerkracht hebben om in dit systeem overeind te blijven.

Veerkracht is zeer algemeen en belangrijk in complexe systemen en dit biocahier geeft hiervan prachtige voorbeelden. Een salmonellabacterie kan snel en precies bouwstenen voor eiwitten naar de goede plek brengen en haar activiteit aanpassen. Planten hebben een set van verdedigingsmechanismen die ze flexibel en specifiek inzetten tegen plaaginsecten. De mens kan levenslang leren, vergeten, herstellen en zich aanpassen mede door de grote veerkracht van onze hersenen. Aan de start zijn de hersenen bij iedereen grofweg hetzelfde, maar ze ontwikkelen zich al snel tot unieke netwerken met een persoonlijke signatuur. Uw hersenen zullen na het lezen van dit biocahier zeker een klein beetje anders en wellicht ook een beetje veerkrachtiger zijn.

Koos Biesmeijer, wetenschappelijk directeur Naturalis Biodiversity Center

Inleiding

De coronacrisis heeft onze veerkracht flink op de proef gesteld, zowel geestelijk als lichamelijk. We moesten twee jaar continu meebewegen met de golven van de coronavarianten die ons land en de rest van de wereld overspoelden en miljoenen slachtoffers maakten. Van lockdown naar lockdown, mondkapje op, mondkapje af, in isolatie, in quarantaine, ziek worden en meestal weer herstellen – soms met langdurige schade – en al dan niet van vaccin naar vaccin naar booster. Ondertussen tart ook de klimaatverandering en de veranderde oost-west verhoudingen de wereld en stelt onze veerkracht nog verder op de proef. Veerkracht is dus een belangrijk thema in deze tijd en sinds een aantal jaren het onderwerp van intensief onderzoek.

Maar wat is veerkracht precies? Wetenschappers zien dit als het vermogen van een systeem om sleutelfuncties en -processen te behouden bij stress of druk. Hierbij zijn drie componenten kenmerkend. Allereerst is er weerstand: het vermogen om schokken te tolereren. Ten tweede is er sprake van herstel: het vermogen om terug te veren naar de uitgangssituatie. En als derde kan er ook transformatie optreden: het systeem past zich permanent aan, het schikt zich naar de nieuwe situatie.

Voor dit biocahier hebben we Nederlandse wetenschappers gevraagd een inkijkje te geven in hun onderzoek naar gewenste en soms ongewenste veerkracht in biologische systemen. Hoe gaan cellen, organismen en ecosystemen om met druk en verstoringen van buitenaf? En wanneer beginnen zij te piepen en te kraken, wanneer zijn de grenzen van hun veerkracht bereikt?

We starten op microscopisch niveau. Hoofdstuk 1 geeft een indruk van de veerkracht van cellen. Ze beschikken over mechanismen om zichzelf en het organisme waarvan ze onderdeel uitmaken, te beschermen tegen ongunstige omstandigheden en aanvallen van buitenaf. Vaak trekken ze gezamenlijk op, zoals de immuuncellen in ons lichaam die de taken hebben verdeeld. De een spoort de indringer op, de volgende valt hem aan. Maar ook kankercellen trekken gezamenlijk op, bijvoorbeeld om aanvallen van het immuunsysteem of van kankertherapieën te trotseren, we spreken dan van ongewenste veerkracht.

In hoofdstuk 2 stappen we van de enkele cel over naar het gehele organisme. Onderzoekers proberen voor allerlei doeleinden de rol van veerkracht in genen van schimmels, planten en dieren te ontrafelen. Dit hoofdstuk laat zien dat er een breed palet is aan mogelijkheden om veerkrachtig te zijn. Variatie is daar een van: wie veel soorten genen heeft om voedsel te verteren zoals een schimmel, kan overleven in verschillende situaties. Beweging is een andere: planten blijken bewegelijker en flexibeler dan we dachten. Een kamerplant op een donker plekje bijvoorbeeld, groeit naar het licht toe en een omgevallen zonnebloem richt zich vrij snel weer op. Deze bewegingen worden in gang gezet door een samenspel van lichtreceptoren en eiwitten die duizenden genen aansturen. Maar planten zijn ook meesters in risicospreiding, eveneens een vorm van veerkracht.

> Wetenschappers zien veerkracht als het vermogen om sleutel-functies en -processen te behouden bij stress of druk

Hoofdstuk 3 zoomt verder uit en kijkt naar organismen en hun omgeving. Het laat zien dat organismen vaak te maken hebben met verschillende verstoringen tegelijk waardoor er een dubbel beroep wordt gedaan op hun veerkracht. Denk aan trekvogels die geconfronteerd worden met een ongelijk tempo van opwarming in hun overwinterings- en broedgebieden, koraalriffen die te maken hebben met klimaatverandering, algenbloei, overbevissing en de druk van toerisme. Of politieagenten die moeten opereren in diverse stressvolle situaties.

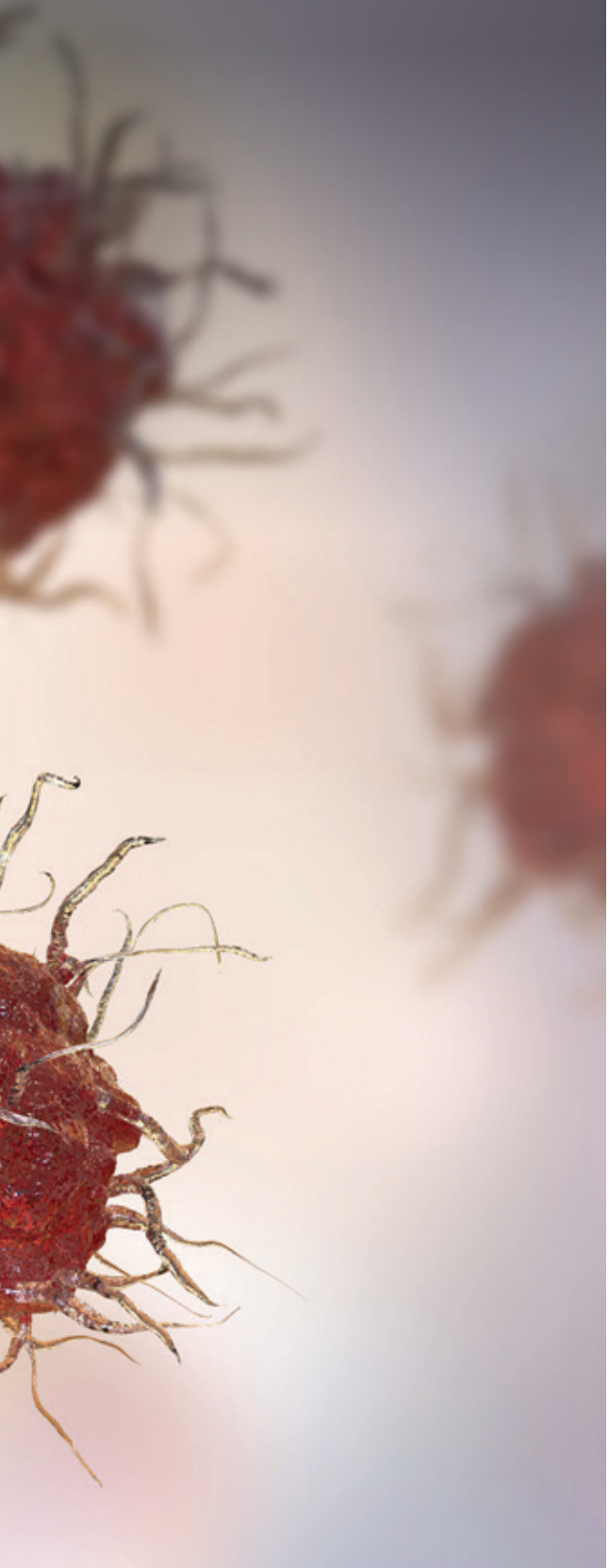
In hoofdstuk 4 zoomen we nog verder uit en dompelen we ons onder in de grote klimaat- en ecosystemen zoals het ijs op de Noordpool, tropische regenwouden en de savannes. Ze kunnen wel tegen een stootje maar er is een grens aan de hoeveelheid Noordpoolijs die kan smelten zonder onomkeerbare gevolgen. De kap van regenwouden kan bijvoorbeeld zorgen voor een ongewenste vicieuze cirkel. Bossen worden kleiner, er valt minder regen in andere gebieden van het regenwoud, dat uitdroging veroorzaakt en leidt tot brand en nog meer bosverlies. Toch zijn ecosystemen veerkrachtiger dan we tot nu toe dachten.

Na het lezen van dit alles heeft u hopelijk een goed overzicht van het belang van veerkracht voor biologische systemen – inclusief de mens – en de aarde als geheel. Veel leesplezier!

De redactiecommissie:
Annette de Deugd, Ellen van Donk, Roy Erkens en Marjolein Sterk

1 Veerkrachtige cellen

Cellen kunnen zich doorgaans goed beschermen tegen ongunstige omstandigheden en aanvallen van buitenaf. Ze wapenen zich, passen zich aan, variëren en werken samen.



Immuuncellen passen zich aan

In welvarende landen komen relatief weinig infectieziekten voor. Bij mensen die daar leven functioneren immuuncellen anders dan bij mensen op het platteland van minder welvarende en arme landen.

MARIA YAZDANBAKHSH

Mensen in welvarende landen, zoals de EU-lidstaten en de VS, zijn op vele fronten bevoorrecht. Ze beschikken over voldoende voedsel, voorzieningen en een goede gezondheidszorg. Hun omgeving is relatief schoon: de lucht die ze inademen, het water dat ze drinken en het voedsel dat ze eten worden zo goed mogelijk gecontroleerd, zodat ze niet geïnfecteerd of vergiftigd worden. Mensen die geboren worden in minder welvarende en arme landen zoals Indonesië, Ghana of Afghanistan, groeien op onder heel andere omstandigheden. Ze kunnen er minder goed op rekenen dat ze elke dag te eten hebben, de sanitaire voorzieningen zijn vaak gebrekkig en de gezondheidszorg laat te wensen over. Ze leven in een andere realiteit.

Hoe functioneert ons menselijk lichaam in die verschillende situaties? Algemeen geldt dat het moet reageren op externe bedreigingen, zodat we de leeftijd bereiken waarop we ons kunnen voortplanten, in evolutionair opzicht een belangrijke mijlpaal voor ons voortbestaan. Ik zal hier bespreken hoe menselijke cellen in verschillende delen van de wereld reageren op bedreigingen van buitenaf zodat de gezondheid zo lang mogelijk behouden blijft. Ik gebruik de cellen van het immuunsysteem om dat te illustreren.

Aanpak op maat

Een daarvan is de dendritische cel. Die bevindt zich in de huid en de slijmvliezen van de darmen en de luchtwegen. Met haar vele tentakels, de zogenoemde dendrieten, detecteert ze of zich gevaarlijke indringers voordoen. Een andere immuuncel

Het immuunsysteem van mensen op het platteland, functioneert anders dan het immuunsysteem van stadsmensen.

is de monocyt, die klaarstaat om onmiddellijk te reageren. Deze witte bloedcel houdt het lichaam continu in de gaten. Beide typen immuuncellen zijn gewapend met moleculen gespecialiseerd in de detectie van indringers. Ze identificeren welke zich voordoen en geven dat door aan cellen die zijn gespecialiseerd in eliminatie. Elke indringer – virus, bacterie, schimmel of parasiet – krijgt een aanpak op maat. Deze opeenvolgende gebeurtenissen zorgen voor verschillende vormen van immuunreacties, afhankelijk van het type indringer. Maar houden de immuunreacties te lang aan, dan beschadigen ze betrokken weefsel. Daarom is dit proces voorzien van feedbackmechanismen die zorgen dat ze op tijd stoppen. Het lichaam komt dan weer in de herstelmodus en gaat uiteindelijk terug naar de normale, gezonde situatie.

De meeste onderzoeken naar het menselijk immuunsysteem zijn uitgevoerd in welvarende landen. In die omgevingen doen zich over het algemeen weinig indringers voor. Infectieziekten zoals mazelen en hepatitis A zijn vaak onder controle, en de mensen leven er in schone huizen en kantoren. Hun immuunsysteem komt maar af en toe vijandelijke indringers tegen en reageert dan met een sterke en korte reactie. Als de indringer echter lang blijft en niet gemakkelijk kan worden uitgeschakeld, laat hun immuunreactie schade achter in organen en weefsels.

De immuuncellen hebben hun reactie succesvol aangepast aan de lokale omstandigheden

Immuunsysteem op platteland

Bij mensen in de minder welvarende en armere landen zien we dat het immuunsysteem anders functioneert, althans op het platteland. Dat komt niet alleen door genetische verschillen, maar ook door een andere leefstijl en door hun omgeving want het immuunsysteem van stedelijke Indonesiers lijkt meer op het immuunsysteem van Nederlanders dan op dat van Indonesische plattelanders. Een van de belangrijkste kenmerken is dat het immuunsysteem op het platteland zwak lijkt te reageren op prikkels van indringers. De dendritische cellen en monocyten slaan minder aan, en als ze dat wel doen, is de ontstekingsreactie minder heftig.

De voedingstoestand speelt daarbij een belangrijke rol. Alle cellen, dus ook die van het immuunsysteem, hebben nutriënten nodig om naar behoren te kunnen functioneren. Wanneer er genoeg eiwitten, koolhydraten, vetten en andere voedingscomponenten zijn, kunnen ze snel en sterk reageren. Suiker in de vorm van glucose is een belangrijke energiebron voor een immuunreactie. Bij schaarste aan voedingsstoffen is een sterke aanval op de indringer niet mogelijk. De dendritische cellen en monocyten sparen dan hun energie, waardoor de immuunreactie op een lager pitje komt te staan. Dat heeft als voordeel dat het immuunsysteem niet voortdurend aan staat. Als dat wel zo was, zou door de veelheid aan prikkels en indringers veel weefselschade optreden.

Weefselherstel

De dendritische cellen lijken in te zetten op een immuunreactie die je vaak aantreft onder die omstandigheden. Vooral weefselherstel is belangrijk. De schade wordt snel ongedaan gemaakt, maar veroorzaakt littekens en weefselverdikkingen. Toch is dit in moeilijke omstandigheden een zeer voordelige reactie, omdat de orgaanfunctie behouden blijft en daarmee de kans op overleving groter is. In veel plattelandsgebieden komen parasitaire wormen als lintworm, schistosoma (veroorzaker van bilharzia) veel voor. Ze richten schade aan in weefsels en organen als lever en nieren. De immuuncellen van de bevolking hebben hun reactie dus succesvol aangepast aan de lokale omstandigheden.

De meeste wetenschappelijke kennis over het menselijk immuunsysteem is vergaard in welvarende landen. Daardoor is die kennis verre van volledig: zeker de helft van de wereldbevolking is daarin niet meegenomen. De inzichten uit deze studie kwamen tot stand doordat we samenwerkten met onderzoeksgroepen in Indonesië, Gabon, Ghana en Oeganda. Een completer plaatje van het functioneren van het immuunsysteem kan ons meer inzicht bieden in de aanpak van ziektes als malaria, aids en bilharzia in rurale gebieden. Daardoor kunnen we betere vaccins maken, die effectief zijn juist in gebieden waar ze het meest nodig zijn.

Aan de andere kant kan deze kennis ons ook helpen te ontrafelen waarom chronische ontstekingsziektes, zoals allergieën, astma en autoimmuunziektes (denk aan reuma en diabetes type 1) nauwelijks voorkomen bij plattelandsbewoners van minder welvarende en arme landen maar wel bij de stedelingen in diezelfde landen en bij de mensen in welvarende landen. De kennis die we hierover verkrijgen, kan hopelijk worden gebruikt bij de preventie van deze chronische welvaartsziekten.

Het immuunsysteem heeft baat bij micro-organismen

Contact met micro-organismen kan het hele immuunsysteem een grotere veerkracht bezorgen. Oftewel, hoe een nadeel een voordeel wordt.

HERMELIJN SMITS

De Duitse arts Robert Koch toonde in 1890 als eerste aan dat infecties met micro-organismen ernstige ziektes konden veroorzaken, met soms de dood tot gevolg. Die ontdekking vormde de basis voor de nog steeds heersende opvatting dat micro-organismen levensgevaarlijk zijn. Bij toeval ontdekte de Schotse arts en microbioloog Alexander Fleming in 1928 dat penicilline, een bioactieve stof uitgescheiden door schimmels, de groei van bacteriën kon remmen. Dit leidde tot de ontwikkeling van antibiotica, die vele levens redden en belangrijkste doodsoorzaak tot dan toe, infectieziekten, enorm terugdrongen. Ook de vergaande preventieve maatregelen om contact met infectiehaarden te verkleinen, hielpen daaraan mee. Met name in de gezondheidszorg waren die van grote toegevoegde waarde: kraamvrouwenkoorts kon er bijvoorbeeld mee worden voorkomen.

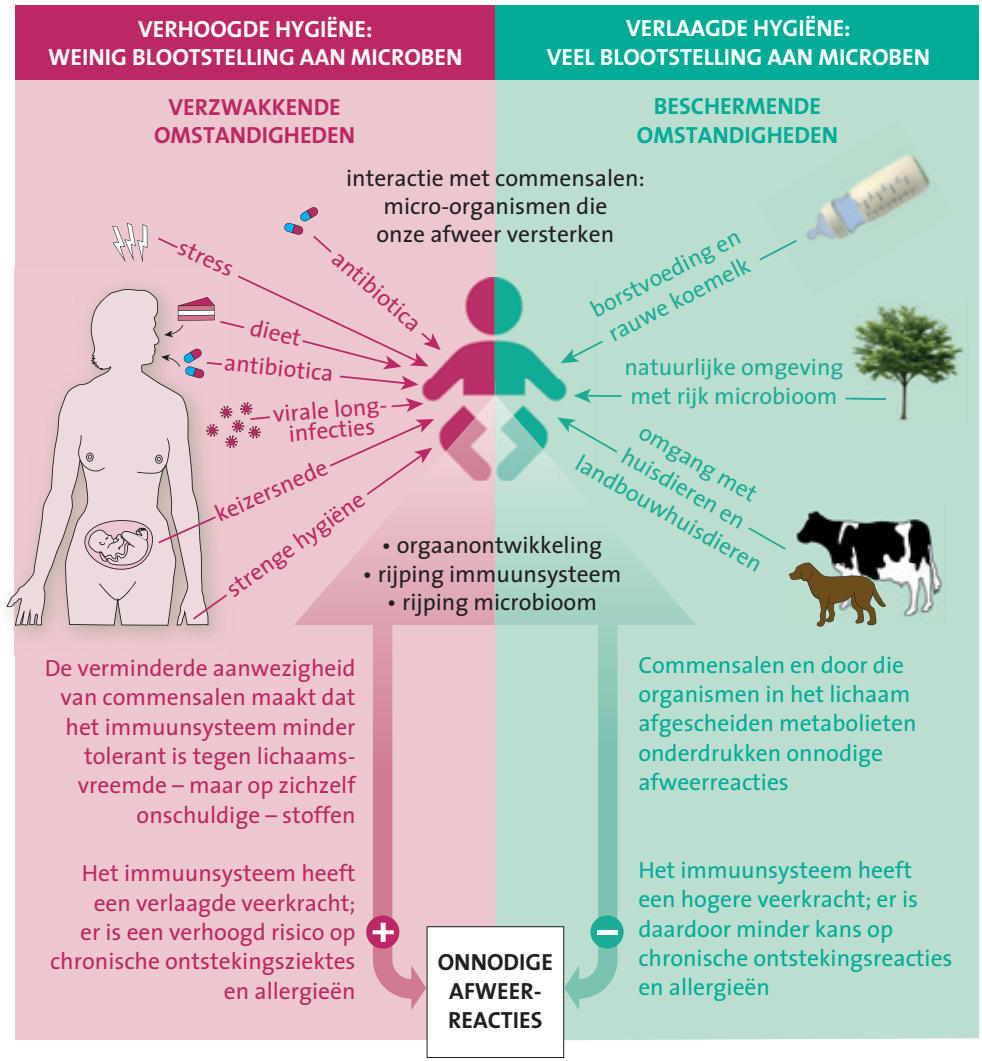
Een overwinning van de mens op de micro-organismen, zou je denken. Maar bijna een eeuw later kampen we met een groeiende antibioticaresistentie en lijdt een groot deel van de wereldbevolking aan chronische ontstekingsziekten, zoals longaandoeningen, diabetes en hart- en vaatziekten. Onbehandeld hebben die de dood tot gevolg, en opmerkelijk genoeg waren ze een eeuw geleden zeldzaam en onbekend. Hoe kan in slechts honderd jaar zo'n ommekeer hebben plaatsgevonden? En wat kunnen we ervan leren?

Snel veranderde levensstijl

Het antwoord op de vraag moeten we zoeken in de geografische verspreiding van chronische ontstekingsziekten. Gedurende de tweede helft van de vorige eeuw staken die met name de kop op in de stedelijke gebieden van westerse landen. Ze lijken hand in hand te gaan met de snel veranderende levensstijl in die gebieden na de Tweede Wereldoorlog. En helaas is een vergelijkbare trend nu ook zichtbaar in de steden van landen met lage en middeninkomens, waar chronische ontstekingsziekten tot voor kort weinig voorkwamen. Ook hier lijkt het ziektepatroon gepaard te gaan met een gewijzigde levensstijl. Voedingsgewoontes, gezinsgrootte, behuizing en sanitair, fysieke activiteiten, het contact met de natuur en met (boerderij)dieren: het is allemaal veranderd.

Wanneer deze factoren onder de loep worden genomen en wordt gezocht naar een grote gemene deler, dan wordt vaak een veranderd contact met micro-organismen genoemd. Het blijkt bijvoorbeeld dat kinderen die opgroeien op een boerderij, veel minder last hebben van chronische longziekten. Dat lijkt men vooral te kunnen terugvoeren op het drinken van onbewerkte koemelk, het dagelijks bezoeken van de koeienstallen gedurende de eerste levensjaren en de blootstelling aan boerderijmicroben.

Maar ook in plattelandsgebieden van Afrika en Zuidoost-Azië, waar veel worminfecties voorkomen, lijkt er een omgekeerde relatie te bestaan tussen chronische ontstekingsziektes en de blootstelling aan parasieten. Dat heeft aanleiding gegeven tot de hygiënehypothese, die stelt dat we door verminderde contact met verschillende typen micro-organismen bevattelijker zijn geworden voor chronische ontstekingsziektes zoals autoimmuniteit (diabetes type 1 en coeliakie), allergieën, diabetes type 2 en sommige vormen van hart- en vaatziekten en kanker. Deze verschillende



> We hebben voordeel van micro-organismen en vormen samen een ecosysteem

ziektes hebben gemeen dat ze kunnen zijn ontstaan door verstoringen in het immuunsysteem. Dat is dan te actief tegen ingeademde of lichaamseigen cellen of onvoldoende waakzaam bij bijvoorbeeld ontspoorde kankercellen.

Commensalen

Micro-organismen bestaan uit één of meerdere cellen en komen in groten getale voor in onze omgeving: op bomen en planten, in de aarde, het water en de lucht, bij de dieren om ons heen, maar ook op en in ons eigen lichaam, bijvoorbeeld in de darmen, in de longen of op de huid. Sterker nog: ons lichaam bestaat uit evenveel micro-organismen die op en in ons leven als uit eigen cellen. Het overgrote deel van deze micro-organismen is niet ziekmakend, en leeft in symbiose met ons: we hebben er wederzijds voordeel van en vormen samen

een ecosysteem. Die micro-organismen worden ook wel commensalen genoemd. Hun samenstelling is zeer divers en omvat bacteriën, schimmels, virussen, archaea (een aparte klasse van eencellige micro-organismen) en wormparasieten. De commensalen vervullen belangrijke functies in ons lichaam. Ze weren ziekteverwekkers, helpen bij de voedselvertering en de energievoorziening in de darmen en hebben bovenal een grote invloed op ons immuunsysteem.

Juist bij dit laatste spelen commensalen een belangrijke rol. Ze vormen geschikte voorbeelden van lichaamsvreemde, maar onschuldige wezens waarmee het tolerantie-opwekkende gedeelte van het immuunsysteem kan oefenen. Maar ze doen meer: ze scheiden ook actief stoffen uit – of vormen ze uit voedingscomponenten – die tolerantieprocessen in gang zetten, de barrièrefunctie van de slijmvliezen versterken en ervoor zorgen dat het immuunsysteem zo goed mogelijk in balans is.

Contact met dieren is goed voor een veerkrachtig immuunsysteem.

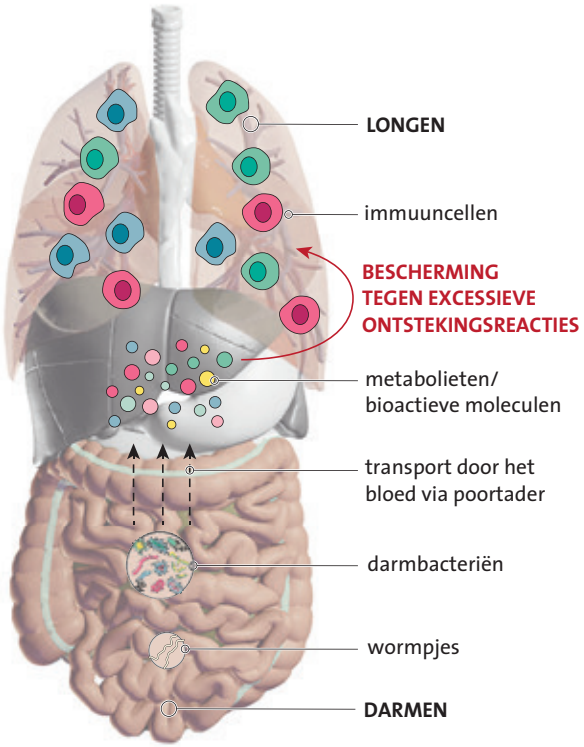
De impact van al deze commensalen, inclusief de wormparasieten, blijkt vooral heel groot te zijn in de vroege kinderjaren, wanneer het immuunsysteem nog volop in ontwikkeling is en de basis legt voor de rest van het leven.

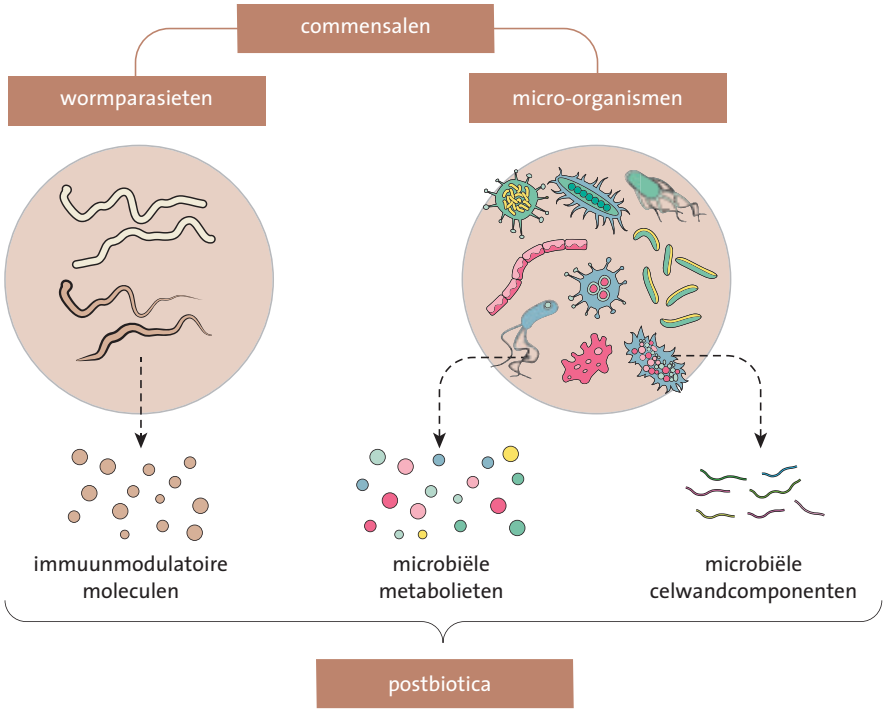
Door de interactie met de commensalen worden overdreven en onnodige afweerreacties actief onderdrukt en de weerbaarheid en veerkracht van het immuunsysteem vergroot, waardoor het risico op het ontwikkelen van chronische ontstekingsziektes en auto-immuniteit veel minder is. Bij auto-immuniteit gaat het om hetzelfde principe. Doordat het tolerantiesysteem onvoldoende werkt, kunnen afweercellen tegen lichaamseigen eiwitten ontsnappen en actief worden. Eenmaal ontwikkelde geheugencellen zijn moeilijk te onderdrukken en verwijderen.

Immuunsysteem in juiste richting

Kunnen we het immuunsysteem in de juiste richting duwen zodat we de vroegere weerbaarheid en veerkracht terugkrijgen? We zouden dan onze moderne levensstijl kunnen combineren met de gunstige eigenschappen van commensalen. Eerdere pogingen met bepaalde bacteriestammen uit de darmen – de zogenoemde probiotica – of stoffen die juist het innestelen van deze bacteriën in de darmen bevorderen – de prebiotica – hebben onvoldoende opgeleverd. Mogelijk zitten reeds opgebouwde afweerreacties en de aanwezige commensalen de innesteling van darmbacteriën in de weg.

Ook is onvoldoende bekend welke commensalen dan gunstige eigenschappen hebben en is het de vraag of dit voor iedereen dezelfde typen commensalen zijn. De herintroductie van wormparasieten met alle nadelige bijwerkingen van dien is geen erg aanlokkelijk vooruitzicht. Daarom richt de wetenschap zich op dit moment op het in kaart brengen en identificeren van bioactieve stoffen die worden aangemaakt of uitgescheiden door com-





Commensalen zoals wormparasieten en micro-organismen in de darmen, beïnvloeden ons immuunsysteem. De moleculen die zij uitscheiden maken het immuunsysteem toleranter voor lichaamsvreemde onschuldige indringers waardoor het in balans blijft.

mensalen en die een gunstig effect hebben op het immuunsysteem. Ze worden ook wel postbiotica genoemd en zijn zeer talrijk en divers van aard. Het is heel aannemelijk dat specifieke postbiotica werkzaam kunnen zijn in mensen uit bepaalde risicogroepen, zoals bijvoorbeeld kinderen uit families met veel allergieën, astma, diabetes type 1 of coeliakie.

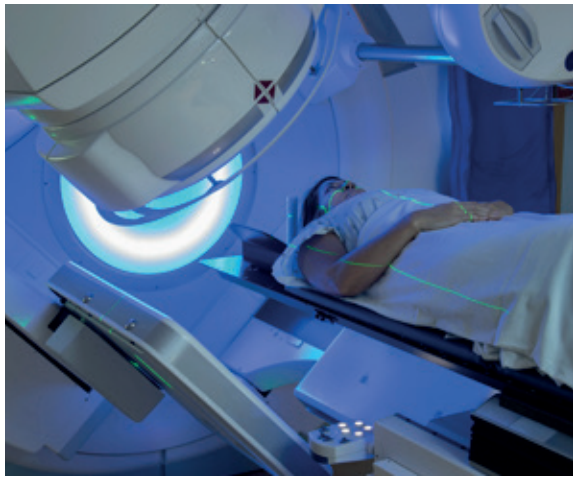
Daarnaast is het tijd voor een maatschappelijke herwaardering van commensalen. Ze versterken immers onze veerkracht en gezondheid. Het zou goed zijn als we meer in contact komen met de 'kleinsten der aarde', de micro-organismen. Dat kan door meer fysieke activiteiten buitenshuis – wandelen in de natuur, sporten in het park, contact met dieren, werken in de moestuin –, meer stedelijk groen en het eten van vers voedsel, dat basisstoffen bevat voor de commensalen. We moeten af van het idee dat alle micro-organismen ziekteverwekkers zijn.

Persoonsgerichte therapie moet kankercellen eronder krijgen

Kankercellen hebben een indrukwekkende maar ongewenste veerkracht. Ze overleven aanval op aanval van het menselijk afweersysteem, en ook behandelingen als chemotherapie en bestraling. Het doorgronden van de mechanismes die kankercellen hun veerkracht geven, is het hoofddoel van veel kankeronderzoek. Toekomstige behandelingen kunnen daarop ingrijpen. Wellicht zal kanker dan niet langer de belangrijkste doodsoorzaak in Nederland blijven.

KOEN VAN DEN DRIES
EN MIRJAM ZEGERS

Dagelijks vinden er in ons lichaam miljoenen celdelingen plaats. Daarbij splitst één moedercel zich in twee dochtercellen. Bij elke celdeling wordt het DNA gekopieerd en netjes verdeeld over de twee dochters. Als dat goed gaat, zijn die genetisch identiek aan hun moeder. Maar soms treedt er een kopieerfoutje op. In de meeste gevallen wordt dat direct opgemerkt, waarna de cel zichzelf uitschakelt. Maar soms wordt het niet opgemerkt. Dan is de genetische informatie van deze cel voor altijd veranderd. Eén of meerdere van zulke veranderingen kunnen uiteindelijk leiden tot ongecontroleerde of ongeremde celdeling – er is een kankercel ontstaan. Die heeft de potentie om uit te groeien tot een kwaadaardige tumor.



Vrouw met borstkanker krijgt bestraling.

Het afweersysteem is een expert in het herkennen van alles wat niet in ons lichaam thuishoort. Daar horen ook kankercellen bij. In veel gevallen herkent het systeem de genetische veranderingen die ontstaan bij celdeling en schakelt dan afweercellen in die de potentiële kankercellen doden en opruimen. Dendritische cellen bijvoorbeeld eten lichaamsvreemde cellen op, terwijl T-cellen kankercellen doden door gaten in hun buitenkant te schieten. Zo voorkomt het afweersysteem waarschijnlijk tientallen keren per dag dat er een tumor ontstaat in je lichaam, zonder dat je het in de gaten hebt. Toch komt kanker veel voor, want kankercellen weten soms op vernuftige wijze aan het afweersysteem te ontsnappen.

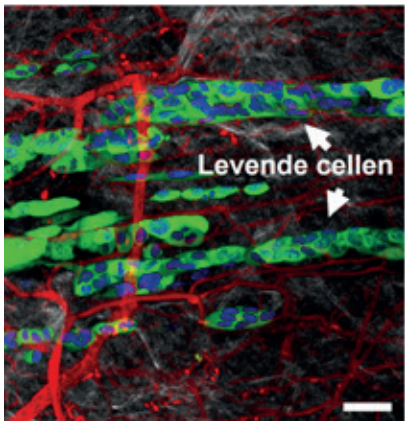
Vermommingen

Het afweersysteem herkent de kankercellen vaak aan de buitenkant. Daar zitten stukjes eiwit die aan het afweersysteem doorgeven dat ze in het lichaam thuishoren. Die stukjes zijn afkomstig van willekeurige eiwitten in de cel. Door genetische veranderingen zijn die bij een kankercel net iets anders dan normaal. Over het algemeen merkt het afweersysteem dat op en schakelt de kankercel dan uit. Maar die is een meester in vermommingen. Zo leiden niet alle genetische veranderingen tot afwijkende eiwitstukjes. Ook zorgen veel kankercellen ervoor dat de stukjes eiwit de buitenkant van de cel niet bereiken. Dit maakt het voor afweercellen soms lastig om de kankercellen te herkennen. De vermommingen leveren een belangrijke bijdrage aan de veerkracht van kankercellen.

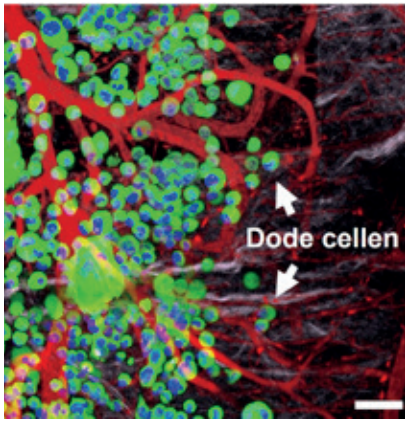
Naarmate kankercellen zich vermeerderen, neemt ook hun veerkracht toe. Ze vormen een collectief en creëren hun eigen micro-omgeving, met een hoge concentratie van stoffen die de werking van

Effecten van kankertherapieën

Hieronder zijn de microscoopopnames van een tumor in de muis te zien: kankercellen zijn blauw, en groen, bindweefsel grijs, bloedvaten rood.
Links: in deze muis zijn na bestraling nog veel levende kankercellen aanwezig. De kankercellen hebben weerstand geboden door zich aan elkaar vast te klampen.
Rechts: deze muis kreeg naast bestraling ook een doelgerichte behandeling om de hechting tussen de cellen te verzwakken. Resultaat: veel dode ronde kankercellen, waardoor de tumor minder goed kan doorgroeien.



Alleen bestraling



Bestraling en doelgerichte behandeling

het afweersysteem remmen. Vaak zijn die stoffen afkomstig uit de kankercellen zelf, maar ze kunnen ook omliggende normale cellen inschakelen om dat voor ze te doen. Dat leidt tot een scala van effecten. Zo zijn er stoffen die ervoor zorgen dat de dendritische cellen geen honger meer hebben, zodat ze de kankercellen niet opeten. Andere stoffen zorgen ervoor dat de T-cellen geen gaten meer kunnen schieten in de kankercellen. Het collectief kan de afweercellen er zelfs toe aanzetten om bij te dragen aan de groei van kankercellen. De afweercellen scheiden dan groeifactoren uit of stimuleren de aanleg van bloedvaten. Als collectief zetten de kankercellen op die manier de afweercellen grotendeels naar hun hand.

Micro-omgeving

De kankercellen kunnen samen ook een micro-omgeving creëren die hen beschermt tegen veelgebruikte kankerbehandelingen. Zo is bestraling gericht op het aanbrengen van DNA-schade in de kankercellen en daarbij is de aanwezigheid van zuurstof essentieel. Maar het collectief kan ervoor zorgen dat de micro-omgeving van de tumor zuurstofarm is waardoor bestraling minder goed werkt. En de stoffen die het collectief uitscheidt om het afweersysteem af te remmen, maken ook immunotherapieën minder effectief. Die behandelingen peppen specifieke afweercellen op. Zo is er een waarbij dendritische cellen buiten het lichaam een spoedcursus krijgen in het herkennen van kankercellen. Eenmaal terug in het lichaam reactiveren ze het afweersysteem door T-cellen nieuwe instructies te geven om de kankercellen te doden. Een andere immunotherapie zet moleculen (antilichamen) in om de rem van het afweersysteem te halen die de tumor had geïnstalleerd.

Deze immunotherapieën geven veelbelovende resultaten. Toch is de veerkracht van kankercellen sterk. Vaak blijkt het oppeppen van één onderdeel van het afweersysteem onvoldoende. De kankercellen hebben nog te veel macht over de andere onderdelen van het afweersysteem om definitief teruggedreven te kunnen worden.

DNA-veranderingen

Een andere bijkomstigheid van de groei van kankercellen is dat ze steeds meer DNA-veranderingen ondergaan. De kankercellen schakelen de natuurlijke herstelmechanismes namelijk uit. Hierdoor ontstaat er na verloop van tijd een grote genetische diversiteit aan kankercellen in de tumor die ook leidt tot veerkracht: kankercellen die niet succesvol zijn in het afslaan van aanvallen gaan dood en de kankercellen die dat wel kunnen, overleven. Kortom evolutie op celniveau. De cellen met de grootste overlevingskansen krijgen de meeste

nakomelingen waardoor het collectief – de tumor – steeds veerkrachtiger wordt.

Op deze manier kan zelfs een sterke behandeling zoals chemotherapie verslagen worden. Om effectief te zijn moeten de toxische stoffen de kankercellen binnendringen. Sommige kankercellen kunnen dit echter voorkomen door de toxische stoffen die hen moeten doden weer naar buiten te pompen. Juist vanwege de genetische diversiteit van tumorcellen is er de laatste jaren veel geïnvesteerd in een zogenoemde doelgerichte behandeling. Daarbij grijpt een medicijn precies in op de specifieke genetische veranderingen die in de kankercellen hebben plaatsgevonden. Net als de immunotherapieën geven deze doelgerichte behandelingen veelbelovende resultaten in klinische studies. Maar hier zorgt de diversiteit van kankercellen ook voor grote problemen. Het specifiek uitschakelen van één overlevingsmechanisme zorgt voor een compenserend overlevingsmechanisme in andere kankercellen die vervolgens voor een nieuwe tumorgroei kunnen zorgen.

Op dit moment denken veel onderzoekers dat de sleutel voor het tegenwerken van de veerkracht van kankercellen ligt in het combineren van verschillende therapieën. Daarbij zal per patiënt goed gekeken moeten worden welke veerkrachtmechanismes in de tumor actief zijn en welke combinatie van behandelingen geschikt is. Deze manier van behandelen wordt persoonsgerichte therapie genoemd. Daarvoor moeten we wel de vele mogelijkheden die kankercellen tot hun beschikking hebben om aanvallen van buitenaf af te slaan goed begrijpen. Alleen op deze manier kunnen we de veerkracht van kankercellen verminderen en de grote verscheidenheid aan kankersoorten effectief behandelen.

Planten en hun cellen: meesters in omgaan met stress

Plantencellen vertonen veerkracht op allerlei niveaus. Ze beschikken over een soort springveer in hun wand waardoor ze in de lengte groeien. De meeste zijn omnipotent – ze kunnen elke type plantencel worden – en ze kunnen ieder heel adequaat reageren op stressfactoren als droogte, hitte, kou en ziekteverwekkers.

TEUN MUNNIK

Anders dan mensen en dieren kunnen planten niet weglopen voor gevaar of stress. Op wat algensoorten na, die weg kunnen zwemmen, staat het overgrote deel van de planten met hun wortels vast in de bodem en moet het ter plekke zien op te lossen. Dus als het koud wordt of zelfs gaat vriezen, kunnen planten niet even schuilen of iets warms aantrekken. Ook bij hitte, als de plant het liefst een stukje schaduw zou opzoeken, zal ze toch ter plekke de hete zon moeten trotseren. Hetzelfde geldt bij droogte of bij vergiftiging door zware metalen of zout. Daarnaast worden planten voortdurend aangevallen door allerlei ziekmakende bacteriën, schimmels en virussen. Juist omdát planten niet weg kunnen lopen, hebben miljoenen jaren aan evolutie en overleving ervoor gezorgd dat planten meesters zijn in het omgaan met stress. Ze behoren tot de veerkrachtigste organismen op deze aardbol. En die veerkracht begint uiteraard op celniveau.

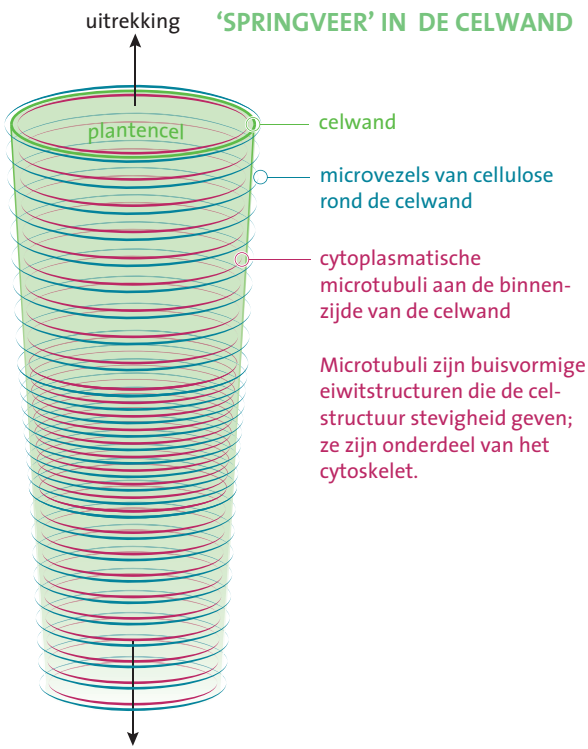
Het belang van water

Voor planten, en voor de cellen waaruit ze zijn opgebouwd, is water het allerbelangrijkst. Ten eerste is het een cruciaal substraat in de fotosynthese waarbij koolzuurgas uit de lucht en water uit de grond met behulp van energie uit zonlicht worden omgezet in suikermoleculen (koolhydraten). Daarmee voeden planten niet alleen zichzelf,

maar ook alle mensen en dieren op aarde. En met zuurstof als uitlaatgas, zijn mens en dier daarmee dus compleet afhankelijk van planten. Zonder hen kunnen ze niet leven. Ook bacteriën, schimmels en virussen kunnen, om andere redenen, direct of indirect niet zonder planten.

Water is niet alleen een bouwsteen voor suikers het is ook superbelangrijk als oplosmiddel voor andere moleculen die essentieel zijn voor de plant, zoals DNA, suikers, eiwitten en mineralen. Bovendien transporteert het nutriënten en mineralen tussen cellen, en van blad naar wortel en weer terug.

Anders dan bij mens en dier is water ook essentieel als moleculaire bouwsteen van de celwand. Die beschermt planten tegen ziekmakers en zorgt voor de algehele stevigheid. Wij mensen hebben botten en spieren, planten ontlenen hun stevigheid aan celwanden en waterdruk, zoals een fietsband die aan lucht ontleent. Strengen van suikermoleculen liggen als kabels om de cel gewikkeld en water houdt het geheel stabiel, sterk en veerkrachtig.



Om de buitenkant van de plantencel zit in een soort springveer. Die zorgt ervoor dat de cel langer wordt zonder zijn stevigheid te verliezen.

Springveer in de celwand

Planten groeien door twee verschillende processen: celdeling en celstrekking. Een plantencel wordt na deling met gemak tien tot twintig keer groter, en dat komt wederom door water. Dit keer wordt het opgenomen door een speciaal compartiment in de cel, de vacuole. Na de celdeling staat de plantencel voor een groot probleem: hoe te groeien met celstrekking, zonder dat de celwand haar stevigheid verliest? Oftewel, hoe houd je de celwand sterk, maar ook flexibel genoeg om de cel tien tot twintig keer langer te kunnen laten worden? En hoe doe je dat voornamelijk in de lengte en niet in de breedte?

De sleutel ligt in de opbouw van de celwand. De cel wordt omgeven door een flinterdun impermeabel membraan. Het zogenaamde celmembraan of plasmamembraan. Daarbuiten ligt de celwand. Erbinnen, in een vloeistof die we het cytosol noemen, liggen behalve de vacuole ook nog tal van andere compartimenten, die allerlei andere huishoudelijke functies hebben. Binnen in de cel zorgt het zogenaamde cytoskelet (een zacht en rekbaar 'geraamte') voor de aanvoer van een eiwit dat individuele suikermoleculen aan de binnenzijde van de cel aan elkaar koppelt tot een streng. Die streng strekt zich uit aan de buitenzijde van de cel, in de celwand.

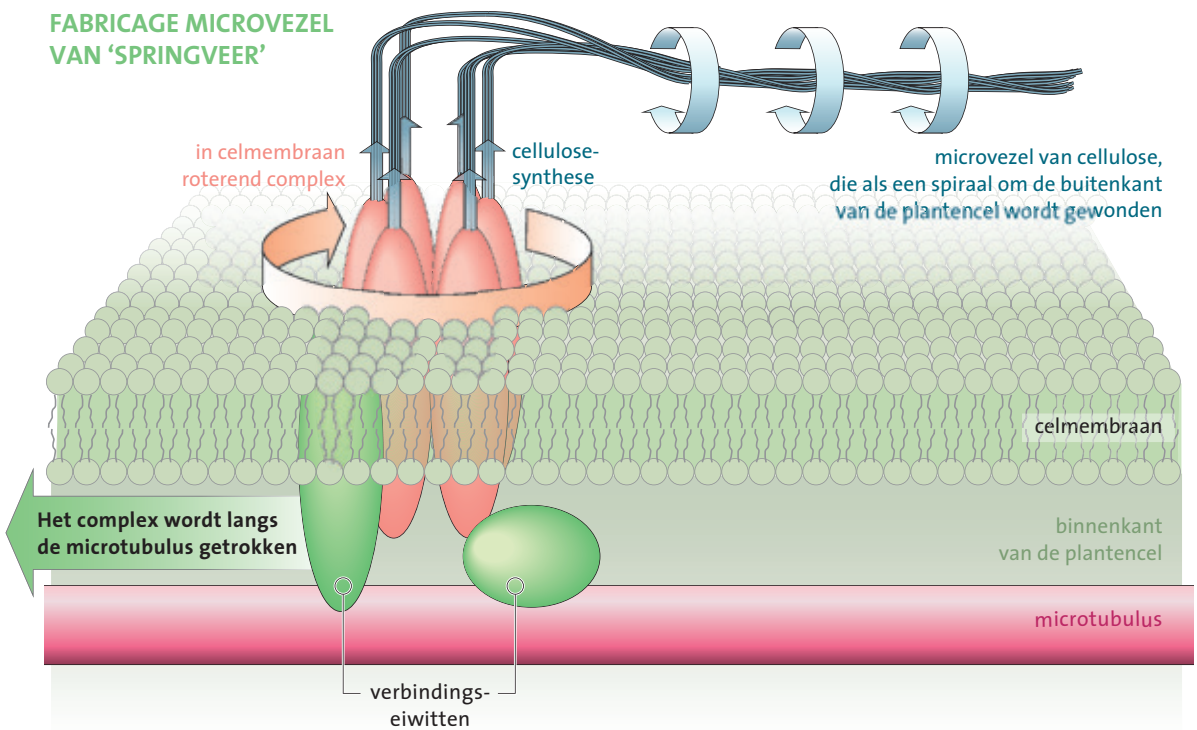
Omdat het cytoskelet de vorm heeft van een soort springveer, die zowel het celmembraan volgt als het eiwit vervoert dat de suikermoleculen aan elkaar vlecht, worden de suikerstrengen (cellulose) als kabels rondom de cel in de celwand aangelegd. Kortere strengen van een andere soort suikermoleculen worden tegelijkertijd ingelegd om samen met water en calciumzouten een geheel te vormen

Elke cel in een plant kan stressfactoren waarnemen en er op reageren

dat driedimensionaal dicht is, én uitermate sterk en flexibel: denk aan een rubberen stuiterbal die je niet kapot kan gooien, in tegenstelling tot een kerstbal. De aanleg van de cellulosekabels in de vorm van een 'springveer' zorgt ervoor dat de cel extreem kan strekken in de lengte, maar niet kan uitdijen in de breedte. Plantencellen groeien daarom hoofdzakelijk in één richting: de wortel omlaag, de scheut met bladeren omhoog. Dierlijke cellen hebben geen celwand en groeien in alle richtingen.

Veerkracht door plasticiteit

Terwijl bij mens en dier de algehele ontwikkeling van embryo tot volwassene vastligt, is dat bij planten niet zo. De meeste plantencellen zijn omnipotent en kunnen uitgroeien tot elk celtype. Zo kun je bladcellen met de daarvoor specifieke omgevingsfactoren en hormonen laten uitgroeien tot wortels, en andersom wortelcellen laten uitgroeien tot bladscheuten. Planten kunnen ook op elke verandering van de omgeving reageren: hitte, kou, vorst, droogte of ziekmakers. Ze passen hun groei en ontwikkelingsstrategie aan om deze stress te kunnen overleven, verder te groeien en te zorgen dat er nakomelingen ontstaan. Elke cel in een plant kan stressfactoren waarnemen en er zo op reageren dat het voor de omgeving en ontwikkeling van de cel het gunstigst is. Cellen reageren bijvoorbeeld op kou door antivriesmoleculen te maken en op droogte met bepaalde stresshormonen die waterverlies voorkomen. Voor elke type stress activeren ze specifieke signaaltransductiesystemen, een soort brandmelders die de stress-signalen omzet-



Omnipotentie van planten: afgeknipte bladscheuten maken in water 'gewoon' weer wortels!

ten in specifieke moleculaire responsen. Die zorgen er weer voor dat de cel zich aanpast aan de situatie, met overleving als doel.

Gecultiveerde planten gevoeliger voor stress

Vooral wilde planten – oneerbiedig vaak onkruid genoemd – kunnen extreem goed omgaan met stresssituaties, terwijl juist de gecultiveerde gewassen – zoals groentes, fruitplanten en sierbloemen – er heel gevoelig voor zijn. De mens moet vaak inspringen om ze te helpen: bewateren bij droogte en hitte, gif spuiten tegen ziekmakers, kassen bouwen voor een kunstmatige temperatuur. Gecultiveerde gewassen zijn ontstaan uit wilde planten, die vervolgens via tal van kruisingen en selecties zijn omgebouwd. Daardoor zijn er allerlei factoren verloren gegaan die cruciaal waren voor hun veerkracht. Enerzijds omdat men dat niet wist, anderzijds omdat kruisingen en selecties onder gecontroleerde condities plaatsvinden in behaaglijke, beschermende kassen; dus zonder wind, droogte, hitte, kou, insecten en schimmels. Tomaten zijn een mooi voorbeeld. Die groeien van oorsprong in Zuid-Amerika, waar ze hoog in de Andes met gemak vorst overleven. Hun vruchtjes zijn daar kleiner dan een knikker, heel bitter, bijna giftig en zeer behaard, waardoor ze insecten kunnen weren. Onze gecultiveerde tomaten – van groot tot klein, in geel, rood en paars – stoppen met groeien als de temperatuur onder de twaalf graden zakt, worden bespoten om alle schimmel-, virus- en insectenplagen het hoofd te bieden en groeien met name in kassen.

Wetenschappers doen er alles aan om in wilde soorten te onderzoeken hoe natuurlijke stressmechanismes bij planten werken. Dan kunnen die natuurlijke eigenschappen uiteindelijk weer teruggekruist worden in de gewassen die dagelijks op ons bord liggen of staan te pronken in vaas en tuin. Zo kunnen we de wonderbaarlijke veerkracht die planten van nature hebben, inzetten voor een duurzamere gewassenteelt. De veerkracht van de natuur is onovertroffen.

De juiste set eiwitten op het juiste m

RAIMOND RAVELLI

Wat maakt een cel veerkrachtig? En hoe meet je die veerkracht? Elke cel heeft mechanismes waarmee ze zich kan aanpassen aan een veranderende omgeving. Zo blijkt de salmonellabacterie heel snel eiwitbouwstenen naar de juiste plek te kunnen brengen om haar injectienaald op het juiste moment te activeren.

EEN BESMETTING met salmonella kan heel vervelend zijn. Je kunt er flink diarree van krijgen en zelfs dood aan gaan. Maar voor salmonellabacteriën valt het leven in ons lichaam ook niet mee. De route die ze daar afleggen, zit vol hindernissen, want ons spijsverteringskaneel kent sterk wisselende omstandigheden: licht basisch in de mond en slokdarm, heel zuur in de maag en neutraal tot basisch in de darm.

De salmonellabacterie beschikt over een soort injectienaald waarmee ze schadelijke stoffen in gastheercellen spuit om zo haar eigen overlevingskansen te vergroten. Die naald mag pas actief worden als de bacterie in de darm is aangekomen. Een ingenieus en complex mechanisme zorgt dat de bacterie de naald inactief houdt wanneer ze zich in de maag bevindt en hem activeert zodra ze in de darm is beland. Hoe doet ze dat, wat maakt dit organisme zo veerkrachtig? Om dat te kunnen begrijpen is gedetailleerd inzicht nodig. Hoe zien de bacterie en de injectienaald eruit? Hoe neemt de bacterie haar omgeving waar? Hoe maakt een bacterie een naald inactief en actief, en hoe snel? Dat soort vragen worden onderzocht door metingen te doen.

Lichtmicroscoop

Tegenwoordig kunnen we met lichtmicroscopen prachtige opnamen maken van levende cellen en daarbij allerlei organellen zien, zoals de celkern met daarin het erfelijk materiaal, en de mitochondria, de energiecentrales van de cel. Losse eiwit- en DNA-moleculen zijn echter te klein om rechtstreeks met lichtmicroscopen waar te nemen. Wel kunnen ze met een oplichtende kleurstof gelabeld worden, waardoor hun locatie kan worden bepaald.

De maximale resolutie van een lichtmicroscoop – de afstand waarop twee punten nog afzonderlijk zijn waar te nemen – bedraagt een halve golflengte van het licht waarmee wordt gemeten. Dat heet de diffractielimiet. Zelfs bij violet licht, dat de kortste golflengte heeft, is de diffractielimiet toch nog 200 nanometer. Dat is lang niet genoeg om de naald van de salmonellabacterie te meten, want die heeft een diameter van tien tot vijftig nanometer. We moeten dus voorbij de diffractielimiet van zichtbaar licht zien te komen.

Dat kan: de afgelopen decennia zijn er superresolutietechnieken ontwikkeld. Die werken als volgt: Je labelt elk eiwit van de bacterie, stelt het exacte midden vast en maakt een foto. Door de posities van alle losse eiwitten te bepalen met duizenden foto's, kun je uiteindelijk een foto van de bacterie reconstrueren met een resolutie die hoger is dan de diffractielimiet. Vervolgens is het mogelijk specifieke eiwitten te labelen en te zien welke wel en welke niet onderdeel zijn van de naald. Daardoor weten we nu dat een inactieve naald bepaalde eiwitten mist die een actieve naald wel bezit.

oment

Salmonellabacterie dringt gekweekte cellen van de mens binnen.

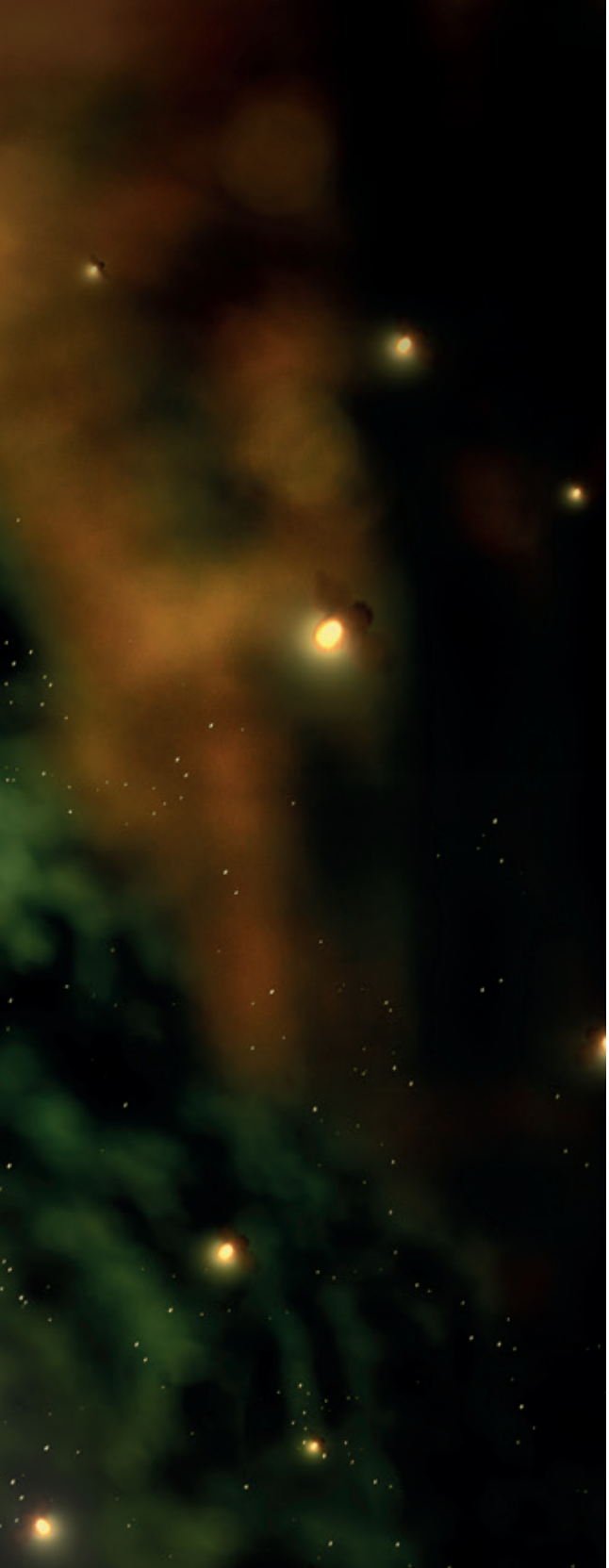
Glasachtig ijs

Om de bouwstenen van een cel, zoals eiwitten, lipiden en DNA, in drie dimensies te kunnen visualiseren, gebruiken wetenschappers röntgenstraling, die een veel kortere golflengte heeft dan zichtbaar licht. Daardoor kennen we nu de ruimtelijke structuur van veel bouwstenen van de cel. Sinds een aantal jaar bepalen we veel structuren ook met cryo-elektronenmicroscopie (cryo-EM). Daarbij worden biomoleculen razendsnel afgekoeld in een flinterdun laagje water, zodat we glasachtig ijs krijgen, en vervolgens wordt dat bestraald met elektronen. Met cryo-EM wordt de salmonellabacterie met haar naald in inactieve en actieve vorm precies in kaart gebracht. Daardoor weten we nu dat de bacterie heel snel nieuwe eiwitbouwstenen aanmaakt en naar de juiste plek brengt om de naald te activeren.

Een veerkrachtige cel weet dus de juiste set eiwitten op het juiste moment bij elkaar te brengen. We weten inmiddels over welke eiwitten salmonella kan beschikken en hoe die eiwitten ruimtelijk in elkaar zitten. Maar hoe de eiwitten precies bij elkaar komen onder invloed van een veranderende omgeving, blijft nog een raadsel. Het topje van de ijsberg is zichtbaar; daaronder valt nog een wereld te ontdekken.

2 Hoe organismen zich aanpassen

Organismen hebben een heel repertoire van mechanismen in huis om weerstand te bieden aan verstoringen of veranderingen. Een groot deel daarvan is verankerd in de genen. De omstandigheden bepalen welk mechanisme het organisme activeert.



Waarom een schimmel niet kieskeurig hoeft te zijn

Schimmels kunnen makkelijk switchen van voedselbron. Zowel generalisten als specialisten kunnen een breed arsenaal aan enzymen inzetten om organisch materiaal af te breken. Dat maakt ze flexibel en veerkrachtig.

RONALD P. DE VRIES

Schimmels zijn alom aanwezig in de natuur. Ze spelen een belangrijke rol in de koolstofcyclus, want ze breken organisch materiaal af en maken het opnieuw beschikbaar voor andere organismen. In de natuur is een grote variatie aan organisch materiaal aanwezig, vooral afkomstig van planten. Dat is dan ook voor veel schimmels de belangrijkste voedselbron, met een enorm gevarieerde samenstelling. Hij voorziet ze van verschillende voedselcomponenten. Sommige soorten eten ze allemaal, andere zijn kieskeuriger.

Verbindingen afbreken

Organisch plantenmateriaal bevat voornamelijk polymere verbindingen, zoals polysachariden (lange suikerketens, zoals die van zetmeel) en de polymeer lignine, ook wel houtstof genoemd. Polymeren bestaan uit een groot aantal verschillende bouwstenen, die via verschillende verbindingen aan elkaar gekoppeld zijn. Aangezien schimmels polymeren niet kunnen opnemen in hun cellen, scheiden ze enzymen uit om ze buiten de cel om te zetten in kleinere verbindingen. Die enzymen zijn zeer specifiek en kunnen meestal maar één type verbinding tussen specifieke bouwstenen verbreken. Daarom produceren schimmels een grote verscheidenheid aan enzymen, die samen alle verbindingen in de polymeren kunnen verbreken.

160 tot 400 genen

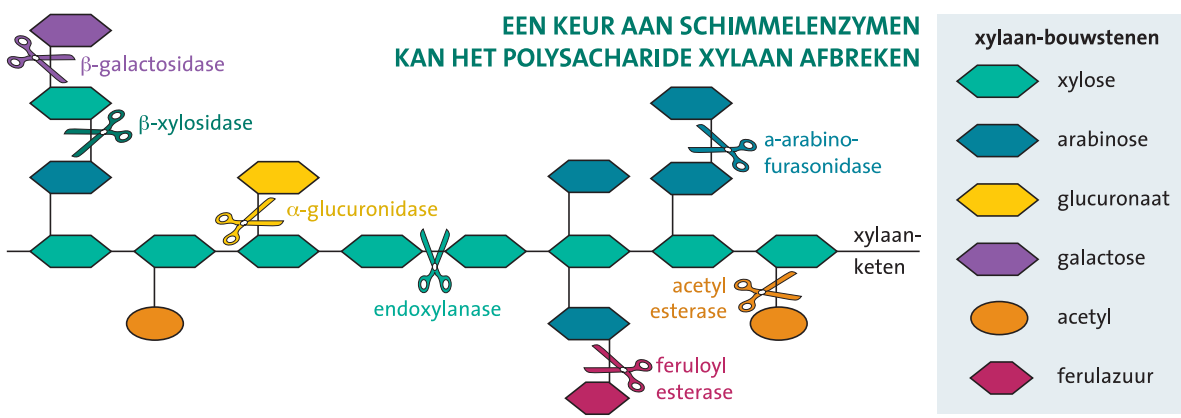
Sinds de DNA-volgorde van het erfelijk materiaal van verschillende schimmels bekend is, hebben we veel meer inzicht gekregen in de variatie aan enzymen die schimmels kunnen produceren. De meeste schimmels die plantenmateriaal kunnen afbreken, blijken wel 160 tot 400 genen te hebben die coderen voor enzymen die bij die afbraak betrokken zijn. Mogelijk nog belangrijker: er zijn van schimmel tot schimmel grote verschillen in de samenstelling van deze enzymensets. Dat roept een aantal vragen op, zoals: Waarom kunnen sommige schimmels meer enzymen maken dan andere? Is er een directe relatie tussen het aantal en type enzymen dat we in het genoom van een schimmel aantreffen en de verbindingen die deze soort al dan niet kan afbreken? En betekent dat, dat een schimmel met meer enzymen ook meer soorten voedsel tot zijn beschikking heeft en daardoor veerkrachtiger is?

Inmiddels heeft een groot aantal wetenschappers die vragen bestudeerd. Er blijkt inderdaad een relatie te bestaan tussen het type enzymen in de schimmel en de mate waarin een substraat afgebroken kan worden. Zo kan een schimmel met veel genen voor cellulose-afbrekende enzymen goed op cellulose groeien en een schimmel met veel pectine-afbrekende enzymen goed op pectine. Dat lijkt te suggereren dat schimmels kieskeurig zijn, maar zo specifiek zijn hun voorkeuren niet. De meeste soorten kunnen meerdere polymeren afbreken en sommige zelfs bijna alle. Ze kunnen dus verschillende voedselbronnen gebruiken, en dat maakt schimmels veerkrachtig.

Generalist versus specialist

De studieresultaten laten zien dat je schimmels kunt onderverdelen in generalisten en specialisten. De generalistische schimmels bevatten een breed arsenaal aan enzymen, geschikt voor elk type polymeer dat ze in de natuur tegenkomen. Maar van elk type enzym hebben ze er slechts één of enkele. De specialistische schimmels daarentegen hebben een duidelijke voorkeur voor één tot twee plantenpolymeren, maar beschikken over een groot aantal enzymen om die specifieke polymeren af te breken. Het aantal enzymen voor andere polymeren is bij de specialisten vaak veel lager of zelfs afwezig. Ze concentreren al hun energie op een beperkt aantal substraten.

Je zou dus kunnen zeggen dat de generalistische schimmels veerkrachtiger zijn dan de specialisten, aangezien ze zich in ruimere mate kunnen aanpassen aan de beschikbare substraten. De generalisti-



Voorbeeld van de enzymatische afbraak van een polysacharide (xylan). De enzymen, hier symbolisch weergegeven als schaartjes, zijn specifiek voor één type binding.

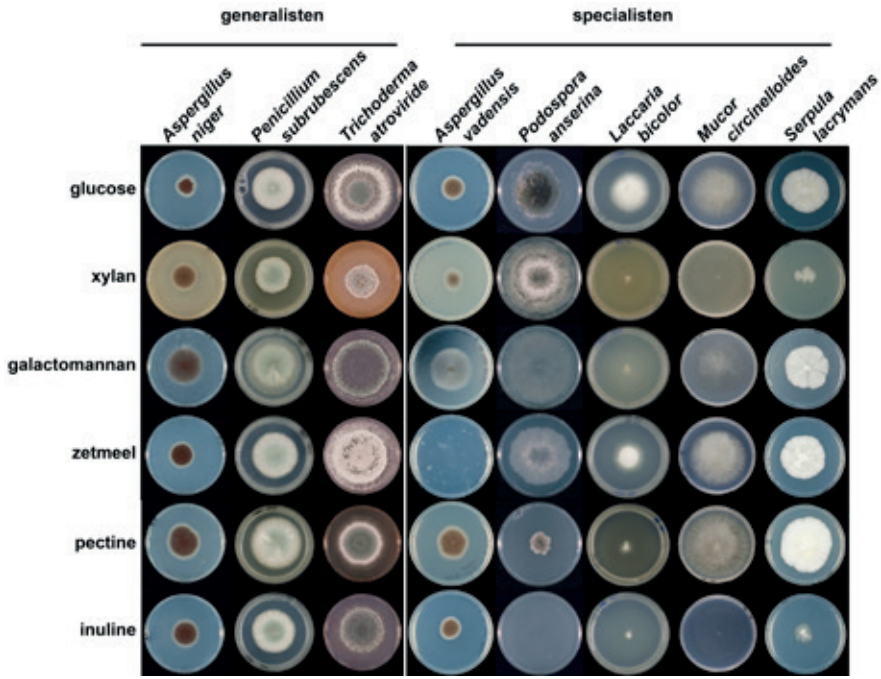
sche schimmels komen meestal dan ook in meer verschillende biotopen voor dan de specialistische schimmels: zowel in de bodem als op planten, bijvoorbeeld. Toch hebben ook de specialisten een zekere mate van veerkracht: de meeste van hen zijn in staat om twee tot drie polymeren goed af te breken, waardoor ze dus nog steeds meerdere voedselbronnen hebben om uit te kiezen. Daarnaast hebben ze vaak een beperkte set enzymen voor de afbraak van andere polymeren, zodat ze daar nét genoeg energie uit kunnen halen om te overleven als hun voorkeurspolymeren er niet zijn.

De juiste enzymen voor elk substraat

Dat er in het erfelijk materiaal genen voor bepaalde enzymen aanwezig zijn, betekent niet automatisch dat de juiste enzymen ook op het juiste moment worden gemaakt. De schimmel beschikt over een regulatiesysteem dat waarneemt welk polymeer aanwezig is, om vervolgens die enzymen te maken die het af kunnen breken. Dit regulatiesysteem is een cruciaal onderdeel van de veerkracht van schimmels. Immers, als de schimmel altijd alle enzymen zou maken, zou hij een groot deel van zijn energie kwijtraken aan enzymen die hij op dat moment niet nodig heeft. Nu wordt er alleen energie gestoken in de productie van die enzymen die ook daadwerkelijk het aanwezige polymeer kunnen afbreken. Een soortgelijk regulatiesysteem vind je ook in andere organismen. Zo passen planten hun verdediging aan de aanwezige belagers aan.

Stapsgewijs verhinderen

Om de veerkracht van schimmels goed in kaart te brengen, hebben wij de afgelopen jaren bestudeerd wat er gebeurt als we de schimmel stapsgewijs verhinderen specifieke plantenpolysachariden te consumeren. Dat hebben we gedaan in de schimmel *Aspergillus niger*, die alle plantenpolysachariden kan afbreken en vaak op fruit wordt gevonden. Hij



Vergelijking van de groei van een selectie van schimmels op verschillende polysachariden van planten. De generalisten groeien goed op alle polysachariden, terwijl de specialisten kieskeuriger zijn.

wordt veel in de industrie gebruikt om enzymen voor allerlei biotechnologische toepassingen te produceren, zoals broodverbeteraars en bio-ethanol, en om citroenzuur te maken voor een breed scala aan voedselproducten, van koekjes en jam tot frisdranken en sauzen.

Zoals eerder beschreven, gebruiken schimmels regulatiesystemen om te zorgen dat ze de juiste enzymen maken die de aanwezige polysachariden kunnen afbreken. Dat systeem bestaat uit diverse regulatoren, die elk hun eigen set genen aanzetten. Het verwijderen van een gen voor één zo'n regulator blokkeert dan ook de afbraak van de gerelateerde polysacharide en dwingt de schimmel om andere polysachariden (indien aanwezig) te gebruiken als voedselbron.

In deze studie hebben we één voor één meerdere regulatorgenen verwijderd, waardoor de schimmel steeds minder polysachariden als voedsel kon gebruiken. Deze mutanten hebben we laten

groeien op tarwezemelen, die bestaan uit drie polysachariden (cellulose, xylan en zetmeel) en daarnaast ook eiwit bevatten. Als eerste hebben we het gebruik van cellulose en xylan geblokkeerd. De schimmel wist desondanks nog steeds goed te groeien. Toen we ook het gebruik van zetmeel blokkeerden groeide de stam veel minder, maar ging niet dood. Dat kwam doordat de schimmel het aanwezige eiwit als voedselbron ging gebruiken. De studie liet dan ook zien dat de schimmel in staat is over te stappen op een andere voedselbron als het gebruik van de voorkeursbron wordt geblokkeerd.

Flexibiliteit

Voor de schimmel is deze flexibiliteit essentieel om te overleven in zijn natuurlijk milieu. De beschikbare voedselbronnen variëren immers sterk en er is ook een sterke concurrentie met andere schimmels en bacteriën. Wij kunnen deze flexibiliteit benutten in biotechnologische toepassingen, bijvoorbeeld door meerdere reststromen uit de landbouw of voedselverwerking als substraat te gebruiken. De schimmels zetten die dan om in de gewenste producten, zoals bio-ethanol, bouwstenen voor bioplastics of citroenzuur. Zo draagt kennis over de veerkracht van schimmels ook bij aan een groene economie.

Planten zijn flexibel

Planten kunnen niet weglopen van hun plek. Toch zijn ze, zonder dat we het zien, continu in beweging. Hun wortels en bladeren groeien naar een omgeving toe die gunstig voor hen is. Op die manier kunnen ze zich snel aanpassen aan nieuwe omstandigheden.

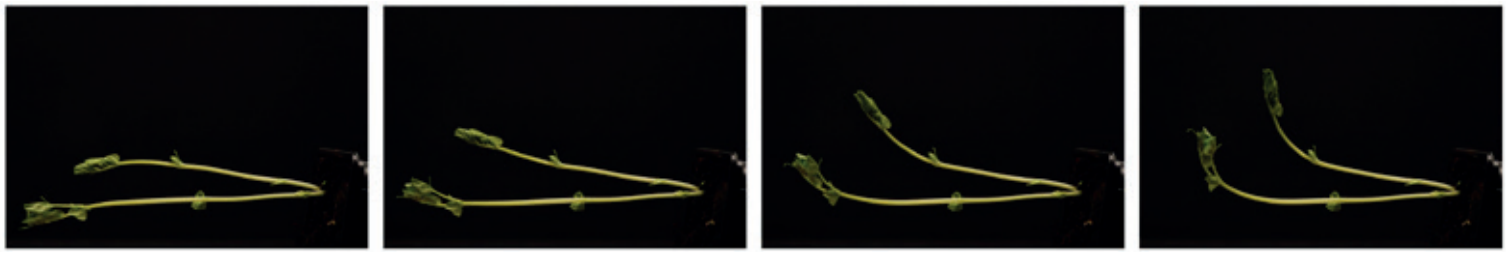
CHRISTA TESTERINK EN RONALD PIERIK

Veerkrachtige mensen reageren met hun gedrag en immuunsysteem op veranderende omstandigheden. Planten kunnen nog meer: ze passen ook hun ontwikkeling aan. Een kamerplant die op een te donkere plek in de huiskamer staat, wacht niet lijdzaam af maar onderneemt actie. Ze groeit in de richting van het licht, bijvoorbeeld het raam. Of denk aan een omgewaaide zonnebloem in de tuin: die past de groei dusdanig aan dat de steel weer naar boven groeit. Ook de planten die in het veld worden blootgesteld aan koude, hitte, droogte en andere steeds maar veranderende omstandigheden, passen hun gedrag en ontwikkeling aan. Die flexibiliteit is de crux van de veerkracht van planten.

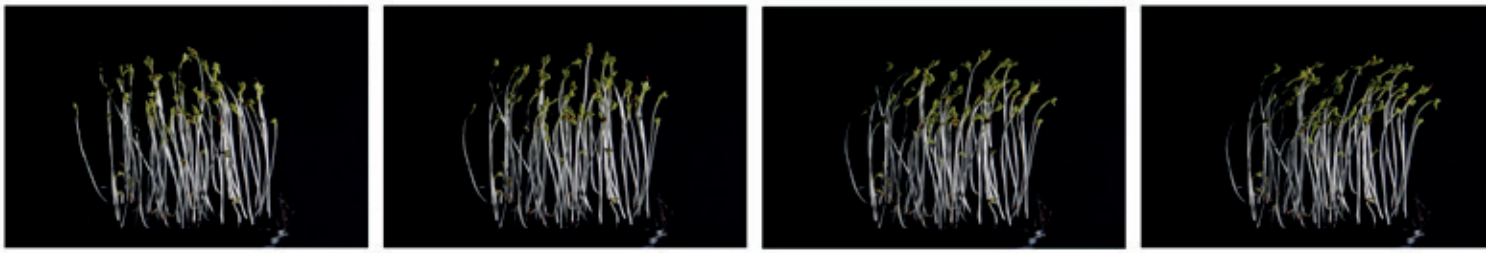
Aanpassing aan droogte

Laten we kijken hoe een plant reageert op droogte. Als er watertekort is, moet ze direct actie ondernemen. Op de korte en lange termijn, want anders legt ze het loodje. We zien dat de plant meteen langzamer gaat groeien, zelfs nog voordat de vertragende fotosynthese (aanmaak van suikers met behulp van licht en kooldioxide) energie tot beperkende factor maakt. Langzamer groeien, gevolgd door een periode van rust waarin de plant haar noodscenario's opstart, is een algemene reactie van planten op stress en gevaar.

Bij vrijwel alle reacties van planten op watertekort speelt het plantenhormoon abscisinezuur (ABA) een hoofdrol. De cellen van de huidmondjes in de bladeren en wortels maken dit plantenhor-



Aan de vorm van de plant kun je zien hoe de plant is gegroeid en in feite ook hoe de plant beweegt. Voor ons staan ze stil, maar kijk je op een langere tijdschaal, dan verandert hun groeirichting. Als we elke dag meerdere foto's maken, en daar een filmpje van maken, zien we die beweging heel duidelijk. Hierboven twee erwtenplanten die horizontaal zijn gelegd en zich in korte tijd weer oprichten om naar boven te groeien (tijd tussen de foto's is telkens 30 minuten). Het volledige filmpje vind je op plantmoves.nl



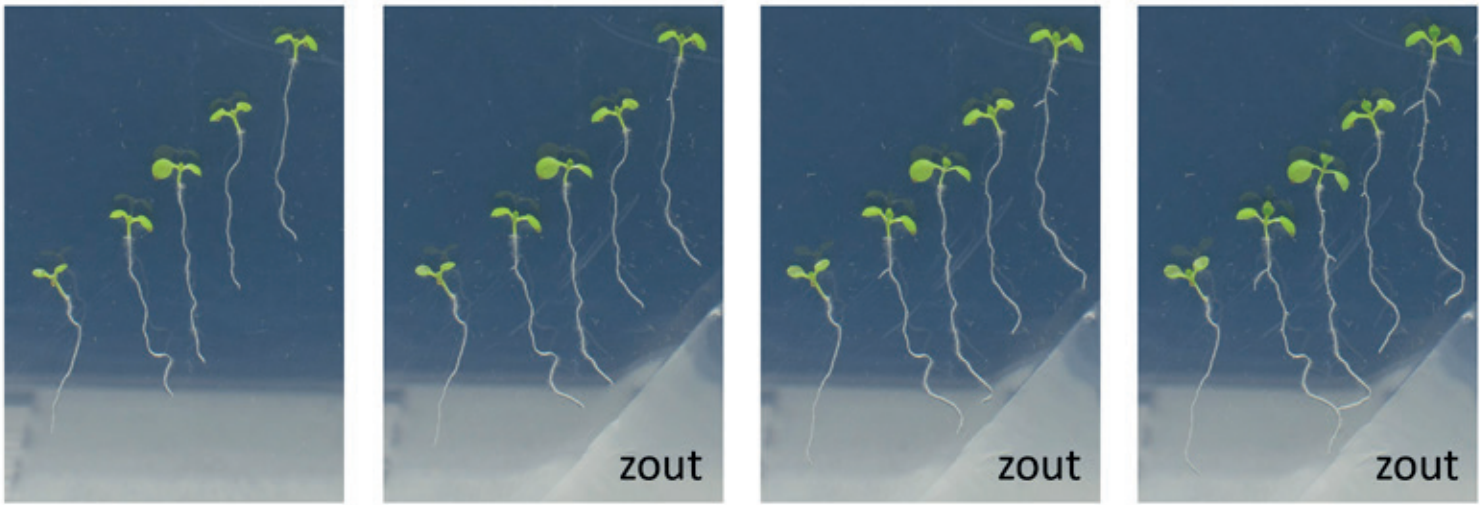
Tuinkers zaailingen die in het donker worden gekweekt zijn zeer gevoelig voor de richting van het licht. In dit voorbeeld is een lamp aan de rechterzijde gezet en zie je de zaailingen in korte tijd naar het licht buigen (tijd tussen de foto's is telkens 30 minuten). Het volledige filmpje vind je op plantmoves.nl

moon aan wanneer er weinig vocht in de lucht of grond aanwezig is. ABA remt de groei én jaagt een heel arsenaal aan noodoplossingen aan, zoals het sluiten van de huidmondjes om het waterverlies te beperken.

Als de droogte aanhoudt, is de plant ook op de langere termijn zuiniger met water. De groeisnelheid blijft lager dan onder optimale omstandigheden en de balans in biomassa tussen wortels en bovengrondse delen verschuift. De plant houdt de bladeren klein en investeert meer in wortelgroei, zodat ze water kan blijven bereiken en opnemen. Ook voor deze langetermijnstrategie is ABA belangrijk, maar hoe het hormoon precies zorgt voor een goede balans tussen groei en stressmanagement, is nog niet duidelijk.

Cellulair commandocentrum

Veerkracht betekent soms ook dat een plant haar organen, zoals bladeren en wortels, vormt op plekken waar de situatie beter is. Of de plant groeit naar die plekken toe. Zo buigen planten richting het licht, weg van de schaduw van de buurman bijvoorbeeld. Planten kunnen buurplanten waarnemen via het licht dat ze weerspiegelen. Speciale receptoren in de cellen van hun bladeren detecteren dat licht en geven de informatie door aan een soort commandocentrum dat in de meeste plantencellen zit. Daarin bevinden zich samenwerkende eiwitten die de activiteit van duizenden genen reguleren. De plant kan daardoor bijvoorbeeld extra veel van het hormoon auxine gaan aanmaken en dat zo verdelen dat de stengels



In dit geval zie je zaailingen van de zandraket (*Arabidopsis thaliana*) groeien op een transparante voedingsbodem. Waneer er zout wordt toegevoegd, in dit geval rechtsonder, in de tweede, derde en vierde foto groeien de wortels de andere kant op. De tijd tussen de foto's is ongeveer 12 uur. Foto: Jasper Lamers. Ook hiervan staat een filmpje van op plantmoves.nl.

extra snel groeien en de bladeren zich oprichten. Daarnaast laten planten actief hun bladeren onderaan afsterven ten gunste van nieuw te vormen bladeren bovenin. Daar zijn ze immers dichter bij het licht en kunnen ze met fotosynthese suikers aanmaken, zodat ze voldoende energie hebben om verder te groeien.

Ondergrondse beweging

Onder de grond hebben planten een vergelijkbare strategie: wortels vormen op plekken met relatief veel water en wegblijven van erg droge plekken. Bij droogte gaan de best aangepaste planten dieper wortelen. Ze kunnen ook weggroeien van zaken die ze liever vermijden, zoals zout in de bodem. Zout (natriumchloride) is voor planten heel schadelijk. Het heeft hetzelfde effect op de plant als watertekort: de wateropname lukt minder goed, doordat de hoeveelheid opgeloste stoffen in het water rond het wortelstelsel te hoog wordt, waardoor ze juist water verliezen naar de bodem in plaats van water opnemen. Daarnaast is zout giftig voor een plant.

Planten zijn in staat het verschil te detecteren tussen te weinig water en de aanwezigheid van het giftige natriumchloride. In het laatste geval is extra actie nodig, zoals het naar buiten pompen van zout uit de wortelcellen of – als dat niet lukt – het weghouden van zout uit de bladeren, omdat het schadelijk is voor de fotosynthese. Maar de opvallendste actie die we zien als wortels in contact komen met zout, is dat ze stoppen met groeien én van groeirichting veranderen. Die laatste reactie heet halotropie en wordt bewerkstelligd door het zojuist al genoemde auxine. In dit geval wordt de auxine anders verdeeld in de wortel, zodat één kant van de wortel harder groeit dan de andere kant. Daardoor buigt hij weg van de plek met veel zout.

Wetenschappers bestuderen deze plantproblemen graag afzonderlijk, zodat de experimenten goed te interpreteren zijn. Het leven van een plant is

echter niet zo simpel: veel problemen dienen zich gelijktijdig aan en moeten dus ook gelijktijdig worden opgelost. Planten zijn niet alleen heel flexibel, ze zijn ook nog eens in staat om die informatie te integreren en af te wegen. En zo komen we weer terug bij het commandocentrum. Wanneer planten een watertekort of hoog zoutgehalte in de bodem waarnemen en de bladeren tegelijkertijd signaleren dat er schaduw dreigt door een harder groeiende buurman, onderdrukken ze de groeispurt tijdelijk. De planten passen de balans tussen de verschillende eiwitten in het commandocentrum tijdelijk aan. Waarschijnlijk voorkomen ze zo dat er te veel water wordt besteed aan groei op een moment dat water juist schaars is.

Het is duidelijk dat planten in het algemeen zeer veerkrachtig zijn. Ze passen zich goed aan de lokale omstandigheden aan. Vaak gaat dit tijdelijk ten koste van hun groei of – in het geval van een gewas – van de oogst. Plantenwetenschappers over de hele wereld proberen kennis te verzamelen waarmee gewassen nog beter bestand kunnen worden gemaakt tegen de gevolgen van klimaatverandering. Het vergroten van hun veerkracht, ook in situaties met meerdere suboptimale en onvoorspelbare omgevingsfactoren zoals droogte en verzilting, hitte en overstroming, is een belangrijk onderdeel daarvan. Die aanpassingen moeten zo min mogelijk ten koste gaan van de groei en opbrengst van gewassen. Zeer gedetailleerde kennis van plantengroei en veerkracht is daarvoor cruciaal. De zoektocht naar de optimale mix is in volle gang.

Fokprogramma kan veerkracht veestapel vergroten

Wetenschappelijk onderzoek laat zien dat de veerkracht van dieren erfelijk is. Die kennis kan benut worden in fokprogramma's. Daarmee kunnen we landbouwhuisdieren selecteren die tegen een stootje kunnen: niet of nauwelijks ziek worden en weinig last hebben van verstoringen in de leefomgeving.

HAN A. MULDER

Er zijn grote verschillen in veerkracht tussen mensen. De ene persoon krijgt nauwelijks griep, terwijl een ander een week met koorts in bed ligt. Of de een heeft hoogstens milde klachten na een coronabesmetting, terwijl de ander op de intensive care belandt met een groot risico op overlijden of blijvende schade. Zulke verschillen doen zich niet alleen voor bij ziektes, maar ook bij andere verstoringen. Zo kan de een veel beter tegen zomerse hitte dan de ander. Dit zijn allemaal voorbeelden van verschillen in veerkracht: hoe gaat iemands lichaam om met een ziekte of een verstoring in de leefomgeving.

Bij dieren is het niet anders: ook die vertonen individuele verschillen op dit punt. Die variatie is voor een deel erfelijk en kan dus worden benut in de fokkerij. De dieren met de beste genetische aanleg voor veerkracht kunnen worden gekozen om de ouders van de volgende generatie te worden. Zo verbetert de gemiddelde genetische aanleg voor veerkracht per generatie.

Topsporters

Maar waarom willen we de veerkracht van landbouwhuisdieren verbeteren? Landbouwhuisdieren zijn in het algemeen 'topsporters'. Om de hoge producties te kunnen halen is een goede verzorging nodig. Verder selecteren we landbouwhuisdieren al jaren op aanleg voor een hoge productie en een goede gezondheid. Tot nu toe werd echter

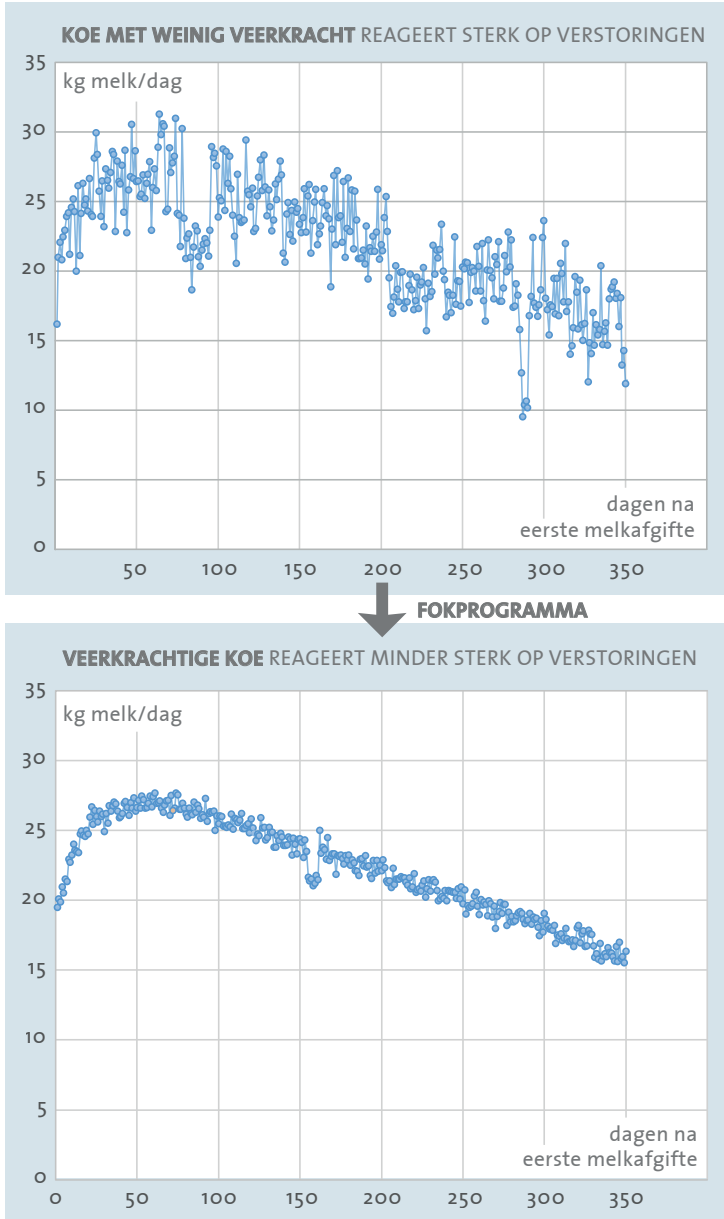
niet doelgericht op veerkracht gefokt. Als je dat wel doet, krijg je dieren die nog beter tegen een stootje kunnen en niet of nauwelijks last hebben van ziektes of temperatuurschommelingen.

De grote vraag is hoe we veerkracht kunnen meten. Landbouwhuisdieren hebben te maken met heel veel verschillende verstoringen in hun leefomgeving, zoals schommelingen in temperatuur of voerkwaliteit of een nieuw dier in de groep. Ze kunnen veel verschillende ziektes krijgen en ze verschillen onderling in gevoeligheid voor die verstoringen of ziektes. Ook heeft een ziekte verschillende effecten op bijvoorbeeld de melkproductie of voeropname van dieren. En verder verschilt de snelheid waarmee de dieren herstellen van de ziekte of verstoring in de leefomgeving.

Tijdreeksen zijn goud waard

Het is nogal tijdrovend om alle verstoringen vast te leggen voor elk individueel dier. Veehouders noteren meestal alleen gegevens van dieren die behandeld worden voor een ziekte. Het zou dus heel mooi zijn als we indicatoren voor veerkracht kunnen ontwikkelen met metingen die boeren toch al doen. Melkrobots registreren bijvoorbeeld van elke beurt hoeveel kilo melk de koe produceert en hoelang het melken duurt. Activiteitsmeters leggen vast wat de koe op elk moment van de dag doet: lopen, liggen of staan, maar ook bijvoorbeeld herkauwen. Voerstations leggen vast hoelang en hoeveel elk dier eet. Melkrobots, activiteitsmeters en voerstations slaan dus van elk dier op heel veel momenten gegevens op. Als een eigenschap gedurende een zekere periode vaak wordt gemeten aan

Niet elke koe geeft elke dag even veel melk.



De veerkracht van koeien is onder andere af te lezen aan de schommelingen in de dagelijkse melkproductie. Links de factoren die de melkproductie kunnen beïnvloeden.

Koeien met een stabiele melkproductie leven gemiddeld langer dan dieren met grote productieschommelingen

het hetzelfde dier, dan noemen we dat een tijdreeks. Tijdreeksen zijn goud waard voor onderzoek naar veerkracht.

Productieschommelingen

Daarbij zit de informatie juist in de schommelingen van een eigenschap. Tot nu toe hebben we vooral onderzoek gedaan naar de melkproductie van koeien. Die produceren tijdelijk minder als ze ziek zijn of last hebben van hitte. Veerkrachtigere koeien vertonen dan geringere productieschommelingen. Een maat hiervoor is de variantie, dat wil zeggen de variatie in afwijkingen van het gemiddelde. Hoe geringer de variantie, hoe groter de veerkracht van het dier: het blijft dezelfde hoeveelheid melk produceren, wat er ook gebeurt. Een andere maat is, hoelang het duurt voordat de koe herstelt en weer terug is op haar normale productie. Dat kunnen we meten door haar 'autocorrelatie' van een koe te berekenen. Dat is de correlatie tussen de afwijkingen in melkproductie van elke gegeven dag met de dag ervóór: dus vandaag en gisteren, gisteren en eergisteren, enzovoort. Hoe langer de hersteltijd is, hoe hoger de autocorrelatie.

Aan de schommelingen in dagelijkse melkproductie kunnen we dus de veerkracht van individuele koeien aflezen. In recent onderzoek hebben we laten zien dat er erfelijke variatie is in deze veerkrachtindicatoren. De erfelijkheidsgraad voor de variantie in melkproductie is 20 procent, terwijl voor de autocorrelatie de erfelijkheidsgraad 9 procent is. Dat betekent dat 20 procent van de verschillen in variantie en 9 procent van de verschillen in autocorrelatie worden veroorzaakt door verschillen in erfelijke aanleg. Sommige stieren hebben dochters met veel schommelingen in de melkproductie, terwijl andere stieren dochters hebben met weinig schommelingen in de melkproductie.

De vraag is natuurlijk of deze statistische maten daadwerkelijk iets zeggen over veerkracht. We verwachten dat veerkrachtige koeien minder ziek zijn en langer leven. En dat blijkt te kloppen: melkkoeien met een stabiele melkproductie hebben minder uierinfecties en stofwisselingsaandoeningen dan melkkoeien met grote schommelingen in melkproductie. Verder leven melkkoeien met een stabiele melkproductie gemiddeld langer dan dieren met grote productieschommelingen. De stabiel producerende koeien reageren ook minder op hittegolven dan de wisselvalligere melkproducenten. Melkkoeien met een lage autocorrelatie herstelden

sneller van een hittegolf dan melkkoeien met een hoge autocorrelatie. Deze statistische analyses tonen dus aan dat schommelingen in dagelijkse melkproductie een maat zijn voor de veerkracht van koeien.

Fokwaardes van veerkracht

De volgende stap is om die erfelijke aanleg voor veerkracht daadwerkelijk te verbeteren in fokprogramma's. Dat begint met het schatten van de fokwaardes van veerkracht, oftewel de erfelijke aanleg van het dier. We veronderstellen daarbij dat veerkracht door een groot aantal genen wordt bepaald. Hoe gunstiger de fokwaardes van bepaalde stieren en koeien zijn, des te veerkrachtiger zullen hun dochters zijn. Boeren kunnen daarop selecteren. Ze kunnen die stieren gebruiken voor kunstmatige inseminatie van hun koeien, zodat het nageslacht een betere veerkracht heeft dan de huidige melkkoeien. Dit betekent overigens niet dat boeren in de toekomst minder goed voor hun koeien hoeven te zorgen, alleen dat de koeien minder problemen zullen hebben, waardoor de boer meer plezier aan ze beleeft. En niet onbelangrijk: door hun grotere veerkracht gaat het welzijn van de koeien erop vooruit.

De komende jaren willen we onderzoeken hoe data van andere sensoren, zoals activiteitsmeters, zijn te gebruiken om nog beter op veerkracht te kunnen selecteren, niet alleen bij koeien maar ook bij kippen, varkens of vissen. Ook willen we onderzoeken in hoeverre er gefokt kan worden met koeien die minder last hebben van hitte, oftewel: kunnen we selecteren op een klimaatbestendige koe? We streven kortom naar dieren met een goede balans tussen efficiëntie en veerkracht, die normale wisselende omstandigheden zonder problemen aankunnen.

Planten doen aan risicospreiding

De komende jaren wil de overheid het gebruik van bestrijdingsmiddelen in de akker- en tuinbouw sterk reduceren. Bij deze verduurzaming zijn juist de eigenschappen die planten veerkrachtig maken van groot belang geworden. Wetenschappers onderzoeken hoe planten zich van nature verdedigen tegen opeenvolgende belagers en proberen daar gebruik van te maken in de teelt.

ERIK H. POELMAN

Op iedere plant in je tuin zie je ze wel: insecten die zich tegoed doen aan de bladeren, stengels, bloemen en zaden. Zelfs als planten tot op de stengel zijn kaalgevreten, staan ze een paar weken later in bloei alsof er niets is gebeurd. Het zijn echte strategen: ze verdedigen zich wel tegen insectenvraat, maar houden tegelijkertijd energie over voor hun groei en bloei.

Een plant staat letterlijk met de voeten in de aarde. Ze kan niet weglopen voor belagers of uit de schaduw van een buurplant stappen en zal op een andere manier moeten reageren op de omgeving. Daarbij zal ze haar reactie moeten doseren, want stopt ze al haar energie in de verdediging tegen rupsenvraat aan de bladeren, dan is ze weerloos tegen een keverlarve die het op de bloemen heeft voorzien. Zo ontdekte mijn onderzoeksteam onlangs dat wilde zwarte mosterdplanten zich voorbereiden op de meest waarschijnlijke volgorde van belagers: eerst een aanval van luizen, dan van rupsen en daarna van keverlarven. Zodra de eerste luizen zich aan de sapstroom tegoed doen, activeert de plant ook de verdedigingsmechanismen tegen de rupsen en de keverlarven die later in het seizoen nog op de plant kunnen afkomen. Dat ontdekten we door zwarte mosterd aan negentig combinaties van insectensoorten bloot te stellen. De plant kon het beste omgaan met die volgordes van insecten die ook in het veld het meest voorkomen.

Erik Poelman – midden op de foto – en zijn onderzoeksteam stelden wilde zwarte mosterdplanten bloot aan negentig combinaties van insectensoorten.

Energie sparen

Een plant balanceert tussen investeren in groei en verdediging. Ze moet ervoor zorgen dat de bladeren voldoende licht krijgen, de wortels voldoende voedingsstoffen uit de grond halen en zich tegelijkertijd verweren tegen een heel leger aan belagers: van schimmels, bladluizen, slakken, rupsen en konijnen tot grote grazers als schapen, koeien en paarden.

Dat begint al als de eerste blaadjes uit het zaad komen. Elke hap door een insect kan het kiemplantje fataal worden. Wanneer het is uitgegroeid tot een flinke plant, is het niet meer zo erg om een deel van de bladeren te verliezen aan insectenvraat. De overgebleven bladeren kunnen voldoende energie opvangen om de schade te compenseren.

Het wapenarsenaal – giftige stoffen, stugge bladeren, stekels, haartjes of plakkerige substanties – verdeelt de plant ook over de organen. Jonge bladeren, voortplantingsorganen en de hoofdwortel verdedigt de plant het felst. Oudere bladeren die nauwelijks meer bijdragen aan de fotosynthese – het omzetten van kooldioxide in suikers met behulp van licht – krijgen minder prioriteit. Bij insectenvraat haalt de plant waardevolle stoffen als suikers en aminozuren daar zelfs weg en brengt ze in veiligheid in de wortels. Als het plaaginsect de buik vol heeft en verdwijnt, gebruikt de plant de stoffen later weer om nieuwe organen aan te maken, zoals een nieuw blad, een stengel of een bloem.

Verdedigingslinie

Zijn er geen belagers, dan is het zinloos om energie te verspillen aan defensie. Veel plantensoorten beschikken daarom over een zogenoemde geïnduceerde verdediging. Op het moment dat de plant wordt aangevallen, herkent ze de schade en versterkt de verdediging door meer giftige stoffen of stekels te maken. Hoe sterk een plant vertrouwt op geïnduceerde verdediging, hangt samen met het risico om aangevallen te worden. Wanneer ze de

belager ontdekt, heeft ze tijd nodig om de verdedigingslinie op orde te brengen. De schade die het insect in de tussentijd aanricht, mag de plant niet de kop kosten. Is het risico op een aanval groot, dan loont het om altijd een flinke verdedigingslinie aan te leggen. Bij een laag risico is het beter om pas in de verdediging te schieten als er echt een belager is.

Planten gaan nog verder in hun risicomanagement. Uit de geuren die vrijkomen bij vraatschade op een buurplant, halen ze informatie over de waarschijnlijkheid dat een aanval op komst is. Hoe ze die geuren precies opvangen en de boodschap eruit vertalen, is nog onbekend. Wel weten we dat de plant na blootstelling aan geuren van vraatschade in een staat van alertheid raakt en heftiger reageert op een daadwerkelijke belager door meer gifstoffen aan te maken.

Herkennen van een belager

Via geïnduceerde verdediging kunnen planten hun verweer richten op de specifieke belager en het orgaan dat wordt aangevallen. De planten signaleren de aanval doordat er speeksel van de insecten in de plantencellen komt of doordat een celwand wordt beschadigd. In de plantencel zitten eiwitten die de stukjes celwand of het insectenspeeksel waarnemen en een afweer in gang zetten. Aan de hand van de samenstelling van het insectenspeeksel herkennen de eiwitten ook het type insect. De plant past daar vervolgens zijn verdedigingsreactie op af. Tegen een rups moet de verdediging in de plantencellen zelf worden aangebracht. Bij een aanval van een luis heeft dat geen zin. De luis manoeuvreert zijn zuigsnuit tussen de plantencellen door om de sapstroom aan te prikken. De verdediging moet dan juist in de sapstroom op gang worden gezet.

Een reactie op rupsenvraat of luizenvraat loopt bij planten dan ook via verschillende routes, aangestuurd door plantenhormonen en regulerende genen. Die routes zijn aan elkaar geschakeld waardoor planten de reactie kunnen bijsturen wanneer ze door verschillende soorten insecten worden aangevallen. Ook hier moeten planten weer balanceren. Een sterke reactie op een eerste belager kan betekenen dat de plant een andere fysiologische route niet maximaal kan gebruiken en zich dus minder goed tegen een andere insectenaanval kan beschermen.

Bovendien kan een effectieve verdediging tegen het ene insect de plant juist vatbaarder maken voor vraat van een ander insect. Bij mosterd- en koolplanten werken de bittere stoffen, glucosinolaten genaamd, goed tegen insecten die veel soorten planten eten. Specialisten die alleen van mosterd- en koolplanten eten, gebruiken deze bittere stoffen juist om de plant als geschikte voedselbron te herkennen en kunnen de glucosinolaten ontmantelen.

De evolutie heeft ervoor gezorgd dat wilde planten zich goed kunnen verdedigen tegen meerdere belagers achter elkaar. Ze laten zich niet uit het veld slaan door de eerste de beste agressor. Die veerkracht hebben we ook nodig in de landbouw, waar de komende jaren steeds minder pesticiden geoorloofd zijn. Brengen we de verdedigingsstrategie van wilde planten door kruisen in onze gewassen, dan kunnen we hun weerbaarheid tegen belagers verhogen en de veerkracht van hun voorouders weer teruggeven.

Rups op weg naar een mals blad van de wilde zwarte mosterdplant.

Moleculaire verdediging in kaart ge

RON M.A. HEEREN

Worden planten aangevallen door biologische vijanden als schimmels of bacteriën, dan slaan ze terug. Met behulp van een moleculaire microscoop kunnen wetenschappers dat proces heel precies volgen, om er vervolgens in de gewasveredeling gebruik van te maken. Met de nieuwe kennis stellen ze het verdedigingsmechanisme van de plant nog iets scherper af.

Planten zijn een belangrijk deel van ons voedsel: direct via granen, groente, fruit en indirect via het vlees van varkens, koeien en kippen. Maar landbouwgewassen hebben te maken met bedreigingen als storm, regen, vuur, vervuiling, temperatuurschommelingen en met vijanden als schimmels, bacteriën en insecten. Het is bijna een wonder dat ze al duizenden jaren standhouden. Ze moeten wel enorm veerkrachtig zijn. Vele wetenschappers houden zich dan ook bezig met deze vragen: Hoe kunnen we de reactie van planten op een bedreiging van buitenaf meten? En hoe past de plant zich aan de bedreigingen aan – anders gezegd, hoe veert de plant telkens terug?

Het antwoord vinden we onder andere met nieuwe moleculaire analysetechnieken die in staat zijn om de lokale chemische samenstelling van het oppervlak van een blad te detecteren. Daarmee kun je heel goed de moleculen in kaart brengen die een plant produceert als ze door een vijand wordt beschadigd.

Molecuulkaart

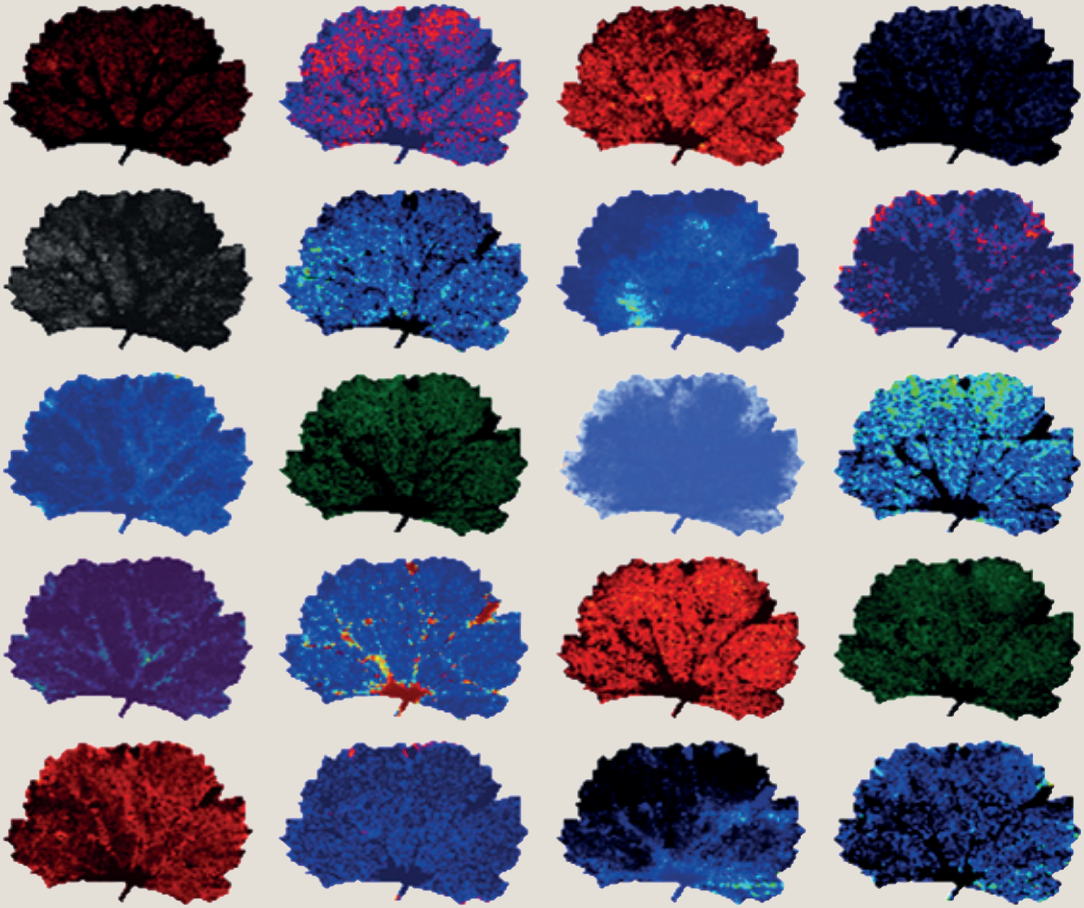
Het werkt als volgt. Het blad wordt met de aangetaste kant onder een moleculaire microscoop gelegd. Zo'n microscoop detecteert de biochemische samenstelling van het blad. Hij bepaalt welke moleculen in het bladoppervlak aanwezig zijn, en wel met behulp van een infraroodlaser die de moleculen verdampt en een massaspectrometer die hun gewicht bepaalt; dat doet hij per vijftig vierkante micrometer. Het resultaat is een uiterst gedetailleerde molecuulkaart van microbiële componenten, die op de foto's van de wijnbladeren te zien zijn.

De molecuulkaart wordt vervolgens gebruikt om de reactie van een plant op een beschadiging door een vijand te bepalen. Een mooi voorbeeld is het onderzoek aan de interactie tussen het blad en een ziekmakende schimmel op een bananenblad. De bovenste laag oftewel de opperhuid van het bananenblad is de ideale plek voor pathogene schimmels. Ze dringen met hun draden de huidmondjes van de bladeren binnen. De schimmels kunnen ernstige schade aan de wereldwijde bananenproductie toebrengen. Het voortbestaan van de banaan als gewas wordt er zelfs door bedreigd.

Verdedigende moleculen

In een studie werd de sierbanaan gebruikt om de moleculaire bestanddelen te bestuderen van de cellaag in de opperhuid van het blad. Met de moleculaire microscoop konden verdedigende moleculen in afzonderlijke plantencellen worden gelokaliseerd. Die gifstoffen ontstaan als reactie op een schimmelinfectie en werden met name gevonden in de huidmondjes van de bananenbladeren. Een plant verdedigt zich dus lokaal tegen de aanval van insecten door stoffen af te scheiden bij beschadiging of infectie.

bracht



Dit zijn moleculaire beelden van één wijnblad dat is besproeid met een microbieel extract. De verschillende plaatjes laten zien waar de moleculen uit het extract zijn terechtgekomen. Elk plaatje geeft de ruimtelijke verdeling van een van de geselecteerde moleculen uit het extract weer.

De verdedigingsmoleculen kunnen helpen om planten in onze voedselketen nog veerkrachtiger te maken. Gewassen kunnen daarmee preciezer veredeld worden, door bijvoorbeeld de reactiesnelheid of de lokale concentratie van de verdedigingsmoleculen te optimaliseren. Ze kunnen dan al bij heel kleine beschadigingen in verweer gaan. Het verdedigingsmechanisme staat als het ware iets scherper afgesteld. De verhoogde weerbaarheid en veerkracht zullen dan in de toekomst leiden tot een hogere opbrengst van verschillende gewassen in de voedselketen.

3 Leven in een sterk veranderende omgeving

Wat als de omgeving verandert op meerdere fronten? Wat doet dat met de organismen die daar leven, inclusief de mens? En hoe kunnen zij zich weren?

Koralen onder druk

De afgelopen dertig jaar is meer dan de helft van de koralen afgestorven. Oorzaken: klimaatverandering, overbevissing en overbemesting. Lokale initiatieven kunnen helpen dit ecosysteem veerkrachtiger te maken. Toerisme kan hierin een centrale rol spelen.

INGRID VAN DE LEEMPUT

Misschien heb je zelf als toerist weleens gesnorkeld of gedoken op een koraalrif. Een adembenemende ervaring. In alle rust zweef je door het water. Het rif lijkt wel een levend schilderij met die diversiteit aan vormen en kleuren. Vissen en andere zeedieren zwemmen rond je en als je stil bent, hoor je de papegaaivis met zijn tanden schrapen over het koraal. Als je je goed hebt voorbereid, weet je hoe je van dit moois kunt genieten zonder schade aan te richten. Je hebt je ingesmeerd met koraalvriendelijke zonnebrandcrème, je raakt het koraal niet aan en verstoort de rust niet.

Waar kijk je op zo'n moment eigenlijk precies naar? Koralen zijn dieren van een paar millimeter. Ze leven in compacte kolonies, in kalksteenstructuren die ze zelf bouwen. Samen vormen ze grote riffen – ze zijn zelfs vanuit de ruimte te zien. In de tentakels van het koraal leven eencellige algen, de zoöxanthellen. Die hebben een deal gesloten met de koralen. Ze vinden onderdak bij het koraal en voeden zich met zijn afvalstoffen. In ruil daarvoor produceren ze voor het koraal voedsel en zuurstof via fotosynthese: met behulp van zonlicht maken ze suikers uit kooldioxide.

Kraamkamer

Doordat koralen riffen bouwen, creëren ze een leefgebied en kraamkamer voor duizenden andere soorten: vissen, krabben, zeesterren, garnalen, slangen, zeezoogdieren met ieder hun eigen rol. Sommige vissen en zee-egels grazen macroalgen weg, die als ze de kans krijgen, het koraal over-

woekeren. Die papegaaivis die je hoorde, knabbelt aan dood koraal dat bedekt is met algen en poept het onverteerbare deel daarvan vervolgens uit in de vorm van fijn, wit zand. Het zand van tropische stranden is dus voor een deel papegaaivissenpoep. Tussen de koralen waaieren zeeanemonen, en daarin voelen de anemoonvissen zich thuis – denk aan Nemo uit de bekende animatiefilm. Samen vormen al die soorten een goed functionerend ecosysteem.

Koraalriffen zijn belangrijk voor mensen. Ze bieden kleurrijke natuur, maar ook voedsel: een kwart van alle vissen wereldwijd leeft op koraalrif. Ook veel vissen die in diepere delen van de zee leven zijn ervan afhankelijk. Het rif is voor hen een kraamkamer. Daarnaast vormen riffen met hun harde structuur een natuurlijke kustbescherming, vooral in gebieden waar vaak orkanen of tropische stormen plaatsvinden. En ze dienen soms zelfs als inspiratie voor de farmaceutische industrie: de werkzame stof in koortslipcrème (aciclovir) bijvoorbeeld is ontdekt in een Caraïbische spons.

> De toenemende dominantie van bodembedekkers is een duidelijk signaal dat koraalriffen onder druk staan

Algen en verbleking

De bodem van een gezond rif is grotendeels bedekt met harde koralen. Maar wereldwijd constateren onderzoekers een aanzienlijke toename in bodembedekkers die licht en ruimte innemen op plekken waar eerder koraal groeide. Die bestaan uit twee belangrijke groepen: macroalgen en cyanobacteriën, ook wel blauwalgen genoemd. Beide hebben licht nodig en groeien sneller dan koralen als er veel voedingsstoffen zijn. Op een gezond rif worden ze heel klein gehouden, omdat ze voortdurend worden weggegraasd door vissen en zee-egels.
De toename van cyanobacteriën is vooral in het Caraïbisch gebied opvallend. Ze kunnen grote hoeveelheden slijmerige matten vormen, die giftige stoffen bevatten en de beschikbare zuurstof op de bodem verminderen.

De toenemende dominantie van deze bodembedekkers is een duidelijk signaal dat koraalriffen onder druk staan en uit balans zijn. Bovendien neemt de verbleking van koralen de laatste jaren enorm toe. Hierbij verlaten de zoöxanthellen de koralen. Als dat te lang duurt, sterft het koraal af. De dieren kunnen immers niet zonder de voedingsstoffen van deze algen. Verbleking wordt meestal veroorzaakt door langdurige hoge temperaturen. In 2016, 2017 en 2020 stierf ongeveer een derde van het koraal af in het noordelijke en centrale deel van het Australische Groot Barrièrerif.

Meestal is de mens de oorzaak. Die heeft voor de huidige klimaatverandering gezorgd, met temperatuurstijgingen en verwoestende stormen als gevolg. Ook de koraalvisserij heeft een negatief effect. De algenetende vissen, zoals de papegaai- en doktersvissen, zijn afgenomen, waardoor macroalgen kunnen doorgroeien. Toenemende landerosie, als gevolg van kustbebouwing en het verwijderen van mangroves en andere bomen, leidt tot meer sediment en voedingsstoffen op het rif. Het rioolwater van hotels, resorts en andere kustbebouwing bemest bovendien het koraalrif. De toename van voedingsstoffen via verschillende wegen speelt macroalgen en cyanobacteriën in de kaart. Deze combinatie van stressfactoren beïnvloedt de algehele veerkracht van het ecosysteem van koraalriffen. Veel voedingsstoffen in het water vergroten bijvoorbeeld de kans op verbleking, en een verbleekt koraal wordt weer makkelijker overgroeid.

Lineair denken

Vaak hebben we de neiging lineair te denken: als de hoeveelheid voedingsstoffen toeneemt met tien procent en dit zorgt voor een afname van de koraalbedekking met vijf procent, dan verwacht je bij een toename van twintig procent een afname in koraalbedekking van tien procent. Zo'n redenering gaat lang niet in alle gevallen op. De coronapandemie is een heel goed voorbeeld van een niet-lineair

Internationaal onderzoeksteam, waarvan Ingrid van de Leemput deel uitmaakt, verkent een koraalrif bij Raja Ampat in Indonesië. Op de voorgrond zijn grote hoeveelheden macroalgen te zien.

systeem. Als het R-getal boven de één komt, krijgen we – althans zonder maatregelen – een exponentiële groei van het aantal infecties. Ook in koraal zien we dergelijke versnellingen, veroorzaakt door zelfversterkende mechanismen.

Een klassiek voorbeeld is het effect van visvangst. Bij hoge visvangst kan het vóórkomen dat er te weinig herbivoren zijn om de macroalgen klein te houden, waardoor de algen toenemen en er minder koraal zal groeien. Doordat koraal een schuilplaats biedt voor vissen, kan de vispopulatie nog verder afnemen en die van macroalgen weer verder toenemen. Zo komt het systeem in een zelfversterkende spiraal terecht.

Zelfversterkende mechanismen vind je niet alleen onder water. Boven water is er ook een: het sociaaleconomisch systeem. De lokale bevolking reageert continu op veranderingen en beïnvloedt bovendien de stressfactoren op het rif. Door de coronacrisis kwamen er weinig toeristen meer, waardoor plaatselijke mensen die in de toerismesector werkten weer overstapten naar visserij of aquacultuur om toch nog inkomsten te krijgen. Steeds meer interdisciplinair onderzoek neemt ook die sociaaleconomische situatie rondom riffen in ogenschouw. Een zelfversterkend mechanisme dat koraalstress in de hand kan werken, is de toename in toerisme. Toerisme kan in veel gevallen tot economische welvaart leiden, die weer tot een toename in bereikbaarheid en faciliteiten leidt, hetgeen vervolgens weer meer toeristen aantrekt.

Hotel met zeezicht

Als toerist dacht je misschien weinig impact te hebben op het systeem, maar als je een hotel met zeezicht hebt, zijn daar waarschijnlijk mangroves

of andere bomen voor gekapt, waardoor de erosie is toegenomen. Ook stroomt het afvalwater uit je toilet vaak ongezuiverd de zee in. Anderzijds betaal je als toerist vaak entreegelden, waarmee de ontwikkeling en handhaving van mariene natuurparken worden betaald. Ook kan jouw aanwezigheid de bestrijding van illegale praktijken stimuleren, zoals dynamietvisserij. Bovendien biedt toerisme een alternatieve inkomstenbron voor al dan niet illegale visserij.

Het is lastig om een goede balans te vinden tussen de negatieve en positieve effecten van toerisme op het koraal en op de lokale welvaart. De route naar ecologisch verantwoord toerisme moet worden onderzocht met lokale overheden en belanghebbenden zoals vissers. Inzichten vanuit de wetenschap over niet-lineaire processen kunnen helpen om toekomstscenario's te schetsen die rekening houden met de veerkracht van zowel het koraalrif als de lokale samenleving.

Dus als je van het mooie rif gaat genieten, vraag dan na bij je hotel hoe ze afval en rioolwater verwerken en overweeg of je echt een kamer met uitzicht op de kust nodig hebt. Duurzaam toerisme is niet goedkoop. Voor een low-budgetvakantie betalen op de lange termijn vaak het rif en de lokale bevolking een hoge prijs.

Meer verliezers dan winnaars

Trekvogels die lange afstanden afleggen, zoals kanoeten, kunnen zich doorgaans goed aanpassen aan veranderende omstandigheden in hun leefgebieden. Maar de klimaatverandering stelt hun aanpassingsvermogen wel erg op de proef. Dit jaar zien we onder de kanoeten minder dan één procent jonge vogels.

JAN VAN GILS

DIT VERHAAL is geschreven vanuit Banc d'Arguin in Mauritanië – zeg maar de Waddenzee van West-Afrika. Het Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ) doet hier dit jaar voor het 20e jaar op rij onderzoek aan kanoetstrandlopers. Dat zijn merelgrote trekvogels die jaarlijks pendelen tussen de Noordpool en de evenaar. Met leden ogen zien we elk jaar minder kanoeten op de Afrikaanse wadplaten, vermoedelijk doordat de aanwas van jonge vogels uit het hoge Noorden stokt. Dit jaar tellen we minder dan één procent jonge vogels onder de kanoeten, een voorlopig dieptepunt.

De aarde warmt in hoog tempo op. Het is een uitdaging voor het leven op aarde om zich daaraan aan te passen. En extra uitdagend is het voor trekvogels, omdat de opwarming niet gelijkmatig is verdeeld over de aarde: het hoge Noorden, waar veel trekvogels broeden, warmt drie keer zo snel op als het gemiddelde van de rest van de aarde. Veranderingen in het broedgebied gaan dus vele malen sneller dan in de langzamer veranderende, zuidelijker gelegen overwinteringsgebieden. Trekvogels lijken moeite te hebben met die verschillen. Vergelijk het met treinreizen: de eerste trein heb je gehaald, ook al loopt hij iets voor op de dienstregeling, maar toch mis je de aansluiting omdat die trein nóg vroeger is vertrokken. Uiteindelijk kom je dus te laat op je plek van bestemming, ook al was je iets vroeger vertrokken.

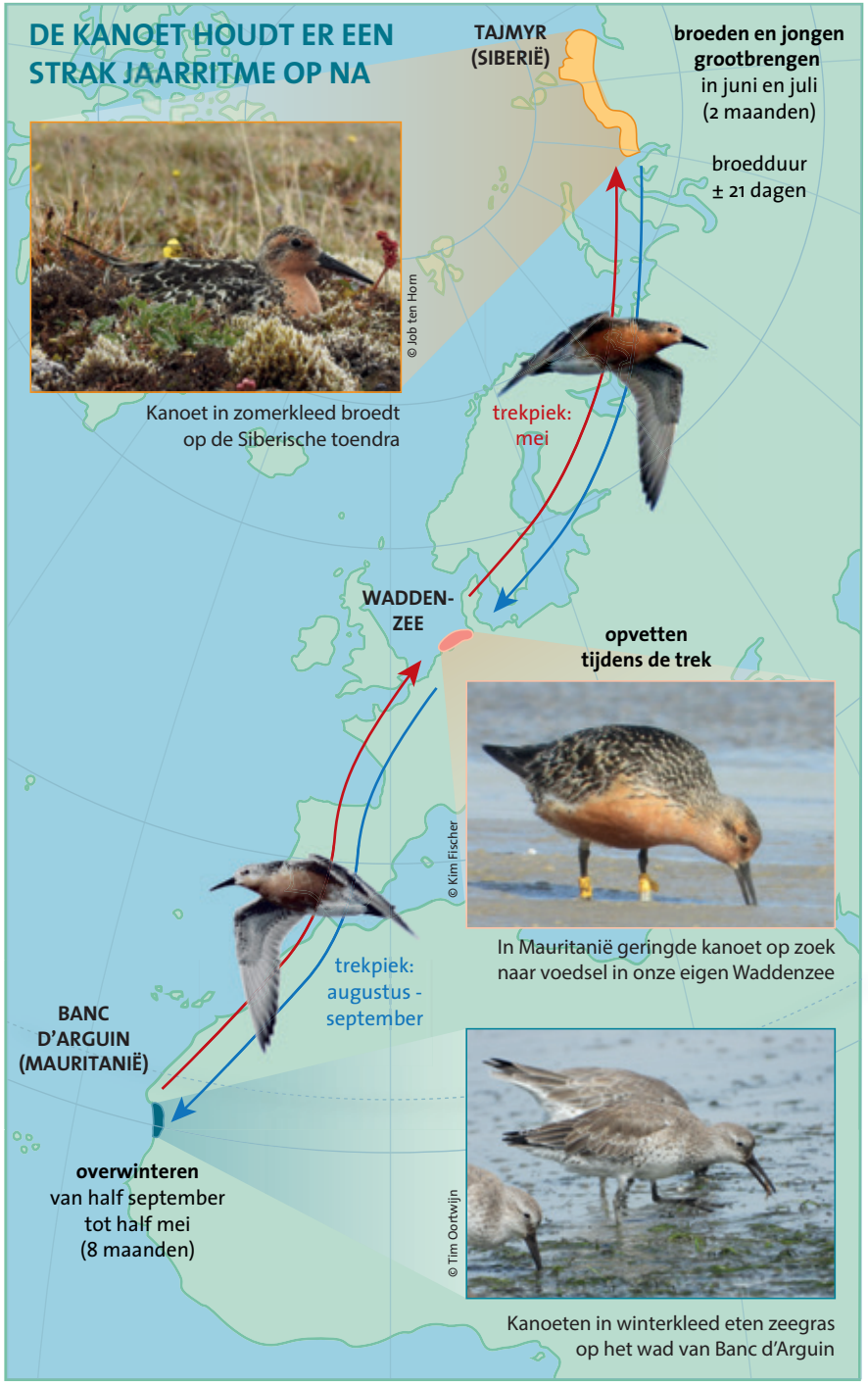
Trekvogels als de kanoet komen ook te laat op hun plek van bestemming, de Arctische toendra

van Noord-Siberië. Daar is de sneeuw in de loop van de voorbije dertig jaar namelijk een maand eerder gaan smelten. Daardoor kruipen ook de insecten nu een maand eerder uit de bodem – het voedsel voor opgroeiende kanoetenkuikens. De kanoeten zouden dus ook een maand eerder moeten aankomen en broeden, willen ze hun kroost laten opgroeien onder ideale voedselomstandigheden. Niets is echter minder waar: de kanoeten zijn de afgelopen dertig jaar slechts enkele dagen vroeger gaan migreren en broeden. De kuikens komen nu dus ná de voedselpiek uit het ei, met alle gevolgen van dien.

Pinokkiokanoeten

Ten eerste is de lichaamsomvang van de kanoeten de afgelopen drie decennia twintig procent gekrompen. Dat lijkt een direct gevolg van verhongering tijdens de kuikenfase, die in het latere leven blijkbaar niet meer gecompenseerd kan worden. Sterker nog, zodra de niet volledig uitgegroeide kanoetenpubers voor het eerst in hun Mauritaans winterverblijf aankomen, dient zich een nieuw probleem aan. Daar eten kanoeten normaliter schelpdiertjes die vrij diep in de wadbodem leven. Maar met hun kleinere lijfjes en kortere snaveltjes kunnen de vogels niet meer goed bij de diep ingegraven schelpdiertjes. Dus lijden ze opnieuw honger. Het alternatieve dieet – ondiep ingegraven zeegraswortels – blijkt niet afdoende, want de vogels met de kortste snavels overleven bijna nooit hun eerste jaar. Die vogels die het wel overleven zijn weliswaar ook kleiner dan hun voorouders, maar hebben toevallig relatief lange snavels – zogenaamde Pinokkiokanoeten. Darwinistische selectie op het Mauritaanse wad dus, met vermoedelijk meer verliezers dan winnaars gezien de sterke populatiedaling.

Niet alleen de grootte en de snavel van de kanoeten is aan het veranderen, maar ook hun gedrag. Al arriveren ze nauwelijks eerder op de alsmaar



Vlucht kanoeten bij de Banc d'Arguin in Mauretanië, de Waddenzee van West-Afrika.

vroeger smeltende toendra, toch hebben ze wel een manier gevonden om tijd te winnen. Hogerop in de heuvels smelt de sneeuw later en komen de insecten later uit de bodem, dus ze nestelen nu hoger. Met elke tien meter extra hoogte winnen ze één dag. Kanoeten broeden zo'n vijftig meter hoger in de heuvels dan voorheen en hebben daarmee een krappe week aan tijd gewonnen. Kuikens die hoger in de heuvels worden geboren blijken inderdaad een betere overlevingskans te hebben dan lager geboren kuikens. Maar de heuveltoppen zijn inmiddels bereikt, dus een verdere verhoging zit er niet in. De laatste strohalm staat op knappen.

Chronisch mannentekort

Tot slot weten we sinds kort dat er een chronisch mannentekort in de kanoetenpopulatie aan het ontstaan is. Vingen we twintig jaar geleden nog evenveel mannetjes als vrouwtjes in ons Mauritaanse studiegebied, nu is de verhouding verschoven naar één man op elke drie vrouwen. Dat lijkt een walhalla voor elke kanoetenman, maar niets is minder waar. De kanoet is namelijk een zeer vooruitstrevende soort: het zijn de vaders die voor het kroost zorgen; de moeders vertrekken direct na uitkomst van de eieren weer naar het zuiden. Mocht een man dus überhaupt al met meerdere vrouwtjes paren, dan zou niets van zijn kroost terechtkomen omdat hij maar voor één broedsel kan zorgen. De scheve verhouding tussen de seksen en de vaderlijke zorg voor het kroost veroorzaken dus een nog snellere daling dan je zou verwachten op basis van de tellingen.

We gissen nog naar de oorzaken van de scheve man-vrouwverhouding. Het lijkt erop dat we die aan beide uiteinden van de trekroute moeten

zoeken. Op het Mauritaanse wad blijkt dat mannetjes tegenwoordig korter leven dan vrouwtjes. Misschien dat de toch al kleinere mannetjes meer last hebben van de lichaamsverkleining dan de vrouwtjes, die van nature groter zijn. Vanwege hun kortere snavels kunnen ze moeilijker bij de ingegraven schelpdieren en zullen als eerste volledig over moeten gaan op de minder voedzame zeegraswortels. Daardoor lopen mannen meer risico om te verhongeren.

Minder zonen

Ook aan het andere einde van de trekroute is er wat aan de hand. Op de Siberische toendra blijken minder zonen dan dochters uit het ei te kruipen. Vooral de vroegste legsels leveren zonen op, late legsels vooral dochters. Omdat de kanoet tegenwoordig laat broedt ten opzichte van sneeuw en insecten, zijn de meeste legsels feitelijk late legsels, die dus vooral uit dochters bestaan. Hoewel kanoeten, zoals vele andere dieren, in staat zijn de geslachtsverhouding van het nageslacht aan te passen, lijken ze er moeite mee te hebben om die af te stemmen op het steeds vroeger beginnende seizoen. Vandaar dat overschot aan meisjes, die later niet aan de man komen.

Samenvattend kunnen we stellen dat de snelle klimaatverandering in het Arctische broedgebied de opgroeimogelijkheden van de kanoetkuikens ernstig verstoort. Dat werkt door in hun latere leven. Lichaamsgrootte, snavelvorm en man-vrouwverhoudingen veranderen, en daarmee de overlevings- en voortplantingskansen. Het moge duidelijk zijn: hoewel kanoeten een groot aanpassingsvermogen hebben, zijn de grenzen van hun veerkracht inmiddels wel bereikt.

We kunnen onszelf nog veerkrachtiger maken

Mensen zijn in principe allemaal veerkrachtig, maar met individuele verschillen. De een kan meer hebben dan de ander. Eerdere ervaringen, je huidige sociale omgeving en je biologische opmaak zoals je genen zijn hierin bepalend. Maar je kunt veerkracht ook – tot op zekere hoogte – trainen.

NIC VAN DER WEE EN STEVEN VAN DER WERFF

We kennen uit ons eigen leven allemaal voorbeelden van situaties waarin het even tegenzit. Je hebt het tentamen niet gehaald, of je loopt net die promotie of nieuwe baan mis. Mensen gaan op verschillende manieren met zulke teleurstellingen om. Sommigen worden strijdlustig en gaan extra hard leren voor de herkansing. Anderen verliezen de moed, trekken zich terug en worden inactief of somber. Die individuele verschillen in veerkracht worden helemaal duidelijk bij zeer ingrijpende of traumatische ervaringen, zoals een pandemie of oorlog. Soldaten die in dezelfde gevechtssituaties terechtkomen, kunnen heel verschillend thuiskomen. De een heeft nergens last van, de ander kampt nog jaren met ernstige psychische klachten en kan niet meer werken.

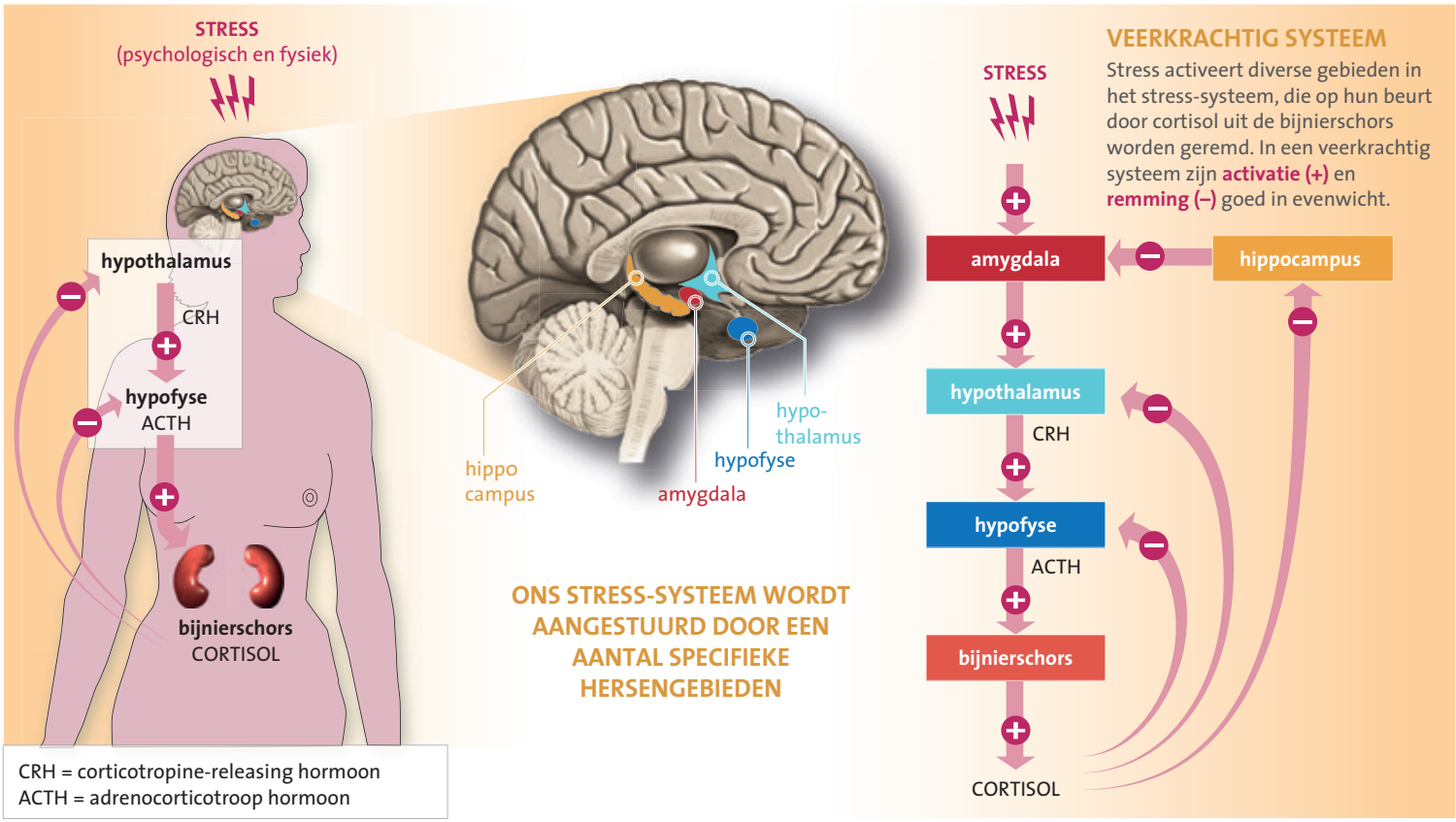
Maar wat is veerkracht nu precies? Weten we wat die verschillen veroorzaakt? Kunnen we onszelf veerkrachtiger maken en zo ja, hoe? Veerkracht betekent: de mate waarin een organisme zich kan aanpassen aan stressvolle en veranderende omstandigheden. Laten wij daar als mens nu buitengewoon goed in zijn! Het orgaan dat daar bij uitstek voor zorgt, zijn onze hersenen. Die verzamelen met behulp van de zintuigen informatie uit de omgeving en sturen andere organen en spieren aan. Soms gaat dat bewust: je schiet de voetbal mooi in de kruising of je bedenkt een plan om een probleem op te lossen. Maar veruit de

meeste acties van de hersenen gaan automatisch. Je hart gaat sneller kloppen op het moment dat je je lichamelijk inspant, je loopt zonder erbij na te denken en je haalt je hand al uit het vuur voordat je pijn voelt. Bij gevaar activeren de hersenen het stresssysteem.

Negatieve klank

Stress heeft in de volksmond vaak een wat negatieve klank, maar eigenlijk hebben we voortdurend met stress te maken. Het is dus belangrijk om er goed mee om te kunnen gaan. In een gevaarlijke of uitdagende situatie stuurt het stresssysteem energie naar de spieren en zorgt ervoor dat je alerter bent. Soms nemen de hersenen zelfs de gehele controle over het lichaam over om maar zo goed mogelijk te reageren op een acute dreigende situatie.

Het lichaam doet dat via een snelle en een wat langzamere route. Bij de snelle route signaleert de amygdala – een hersengebiedje – een mogelijk gevaarlijke situatie en geeft een seintje aan de hypothalamus – het regelgebied in de hersenen – die vervolgens opdracht geeft tot de afgifte van twee hormonen: adrenaline door de bijnieren en noradrenaline door de locus coeruleus in de hersenstam. Het effect daarvan voel je bij hevige schrik: je adem stokt even, je hartslag gaat omhoog en alle energie gaat naar de spieren. Die reactie is afhankelijk van de situatie en je hebt er weinig tot



Politieagenten lopen een groot risico op een traumatische ervaring.

geen controle over. Reacties die vaak voorkomen zijn vechten, vluchten, bevriezen of flauwvallen.

De wat tragere route verloopt via verschillende hormonen van de hypothalamus, via de hypofyse – een klier onderaan de hersenen – naar de bijnieren, die uiteindelijk cortisol vrijgeven aan de bloedstroom. Door dit hormoon kun je je aanpassen aan de nieuwe omgeving na de eerste reactie op de gevaarlijke situatie.

Balans

Sommige mensen lukt het niet om de balans te herstellen of zich goed aan een blijvend stressvolle situatie aan te passen. Dan ervaren ze chronische stress. Ze kunnen last krijgen van somberheid of terugkerende angst. Onder meer de hippocampus speelt daarbij een cruciale rol. Een belangrijke functie van dit hersengebied is het opslaan van herinneringen. Ook remt de hippocampus het stresssysteem wanneer het cortisolniveau toeneemt. Daardoor kunnen we van eerdere stressvolle situaties leren en in de toekomst beter op soortgelijke situaties reageren. Maar een al te sterke prikkeling – bijvoorbeeld door heftige of langdurige traumatische ervaringen – kan ook klachten veroorzaken. Zo ontwikkelen sommige mensen na een traumatische ervaring een posttraumatische stressstoornis (PTSS). Onverwacht terugkerende herinneringen aan het trauma zorgen dan voor stress- en angstreacties. Het stresssysteem is ontregeld.

Studies bij proefdieren laten zien dat een bepaalde mate van prikkeling van het stresssysteem tijdens de ontwikkeling onontbeerlijk is voor veerkracht. Jonge apen die tijdens hun ontwikkeling geen uitdagende ervaringen tegenkomen, zoals contact met vreemde apen of mensen wanneer de moeder afwezig is, kunnen later minder goed omgaan met stressvolle situaties. Te veel en te heftige ervaringen, zoals lang alleen moeten zijn,

leiden ertoe dat apen later moeilijker met stressvolle situaties kunnen omgaan en ook minder goed sociaal functioneren.

In studies naar mensen zien we een soortgelijk patroon. Kinderen uitdagen – bijvoorbeeld hen iets sociaals laten ondernemen of oplossen zonder ouder – is goed voor een gezonde en veerkrachtige ontwikkeling. Natuurlijk moeten zulke situaties niet te heftig of langdurig zijn. Mensen die in een onveilige situatie zijn opgegroeid, bijvoorbeeld in een gezin met veel geweld en verwaarlozing, hebben vaak minder vertrouwen in anderen. Het contact met andere mensen verloopt vaak moeizaam. Daardoor functioneren ze minder goed. Ook hebben ze gemiddeld veel meer psychische klachten.

> Kinderen uitdagen is goed voor een gezonde en veerkrachtige ontwikkeling

Sociale steun

Wat ook een grote invloed heeft op veerkracht, is de hoeveelheid sociale steun die iemand ervaart na het meemaken van een heftige ervaring. Als mensen weinig sociale steun krijgen en zich niet serieus genomen voelen door hun omgeving, lopen ze een grote kans op PTSS en is behandeling lastig.

Een militair, politieagent of medewerker bij de ambulancedienst of brandweer loopt een relatief groot risico op een traumatische ervaring. Maar uit onderzoek blijkt dat politieagenten gemiddeld beter bestand zijn tegen stressvolle ervaringen dan de gemiddelde Nederlander. Dat kan natuurlijk komen doordat gevoelige mensen zich niet snel zullen aanmelden bij de politieacademie, maar ook doordat de academie streng selecteert en de agenten in opleiding traint op specifieke heftige ervaringen. Door in een veilige omgeving te oefenen op situaties met bijvoorbeeld geweld of gewonden zijn agenten beter voorbereid op het moment dat ze moeten handelen in échte gevaarlijke situaties. Uiteraard verschillen ook agenten in veerkracht. Ondanks de selectie en de trainingen zullen sommigen van hen toch klachten krijgen na heftige ervaringen.

Onze hersenen zijn een complex orgaan. Bestudering van veerkrachtige hersenen is daarom zeer ingewikkeld. Daarnaast ontstaat veerkracht in een samenspel van eerdere ervaringen, de ervaren sociale steun en de biologische bouw. Dat maakt de bestudering ervan nog lastiger. De eerste onderzoeken naar de rol van de hersenen in veerkracht richtten zich voornamelijk op de verbindingen met het stresssysteem, het geheugen en de systemen waarmee we gevoelens en reacties controleren. Recent onderzoek lijkt erop te wijzen dat een grotere hippocampus samenhangt met een toegenomen veerkracht. En studies naar wittestofverbindingen (de communicatiekanalen tussen hersengebieden) laat zien dat de kwaliteit daarvan bij veerkrachtige politieagenten hoger is en dat dit samengaat met een andere manier van omgaan met problemen. De agenten in kwestie zijn meer geneigd om heftige situaties te herinterpreteren op een positieve manier.

Dus ja, we kunnen onszelf veerkrachtiger maken, vooral als we op tijd beginnen. Door kinderen in een veilige en voldoende uitdagende omgeving te laten opgroeien en goed onderwijs te geven. Door onze naasten – familie, vrienden, collega's, cliënten – serieus te nemen en steun te bieden op het moment dat ze het zwaar hebben. Maar ook door als maatschappij aandacht te hebben voor de impact van heftige situaties en mensen zorg aan te bieden die er psychische klachten aan hebben overhouden. Tot slot kun je veerkracht ook versterken door te trainen op situaties die je in de toekomst waarschijnlijk zult meemaken. Die aanpak is vooral belangrijk in beroepen waarin heftige ervaringen erbij horen.

De plastische hersenen

Hersenen kunnen zich goed aanpassen aan een veranderende omgeving. Ze kunnen zelfs hun structuur, verbindingen en functie veranderen, zo blijkt steeds duidelijker uit onderzoek. Daardoor kunnen we levenslang leren en herstellen na een hersentrauma. Wetenschappers proberen met behulp van kunstmatige intelligentie nog meer gebruik te maken van dit neuroplastische potentieel zodat patiënten adviezen op maat kunnen krijgen.

WOUTER DE BAENE & MARGRIET SITSKOORN

De sleutel tot veerkracht bij de mens ligt voor een groot deel in de hersenen. Niet alleen omdat de hersenen in interactie met hun omgeving en genen bepalen wat je kunt, voelt, denkt en doet, maar ook omdat ze bepalen hoe je je ontwikkelt en aanpast. Dat is mogelijk doordat hersenen neuroplastisch zijn: de hersencellen kunnen hun structuur, verbindingen en functie gedurende het leven veranderen.

Tot de jaren zeventig namen wetenschappers aan dat deze neuroplasticiteit alleen tijdens de kindertijd bestond. Daarna zouden de structuur en het functioneren min of meer vastliggen. De laatste decennia is echter meer en meer bewezen dat de hersenen gedurende de hele levensloop plastisch blijven. Hun functie en organisatie kunnen veranderen door nieuwe ervaringen, schade of het leren van nieuwe vaardigheden. Dankzij hun neuroplasticiteit kunnen de hersenen zich ontwikkelen en kan de mens goed functioneren, leren en zich aanpassen aan veranderende omstandigheden, veroudering of hersenschade.

Kinderen leren alleen taal als zij er tijdens een kritieke periode aan worden blootgesteld.

Drie vormen

Voor de ontwikkeling van de hersenen zijn drie vormen van plasticiteit bepalend. Voor een groot deel zijn het spontane, interne processen die de hersenen vormen. Deze zogenoemde ervaringsonafhankelijke plasticiteit verloopt vanzelf volgens een genetisch programma, zonder dat er extra externe prikkels voor nodig zijn. De vorming van de cellen in het netvlies is daar een voorbeeld van. Dan is er de ervaringsverwachte plasticiteit. Essentieel daarvoor is de combinatie van het genetisch programma met de juiste externe prikkels op het juiste moment: de hersenen hebben een bepaalde ervaring of externe stimulatie nodig om zich te kunnen ontwikkelen. Kinderen leren bijvoorbeeld taal, maar alleen als zij tijdens een kritieke periode eraan worden blootgesteld.

Onder normale omstandigheden ondergaat iedereen deze twee vormen van plasticiteit, de ervaringsonafhankelijke en de ervaringsverwachte. Daardoor heeft iedereen grofweg identieke hersenen. Vervolgens zorgt de ervaringsafhankelijke plasticiteit, de derde vorm, dat het brein op een unieke, persoonsafhankelijke manier verandert. Met het ouder worden verliezen de hersenen wel de eerste twee vormen van plasticiteit, maar het vermogen tot ervaringsafhankelijke plasticiteit blijft behouden. Ook op je tachtigste kun je bijvoorbeeld nog steeds leren jongleren, ook al gaat dat wat moeizamer dan toen je twintig was.

Neuroplasticiteit van de hersenen komt voor op

verschillende niveaus, die onderling met elkaar samenhangen. Moleculaire veranderingen, bijvoorbeeld in de genen, leiden tot verandering in de sterkte en efficiëntie van de communicatie tussen hersencellen. En die leidt weer tot veranderingen in hersennetwerken: de verbindingen die betrokken zijn bij bijvoorbeeeld motorische controle kunnen talrijker en sterker worden.

Neurale verbindingen prikkelen

Net zoals spieren getraind moeten worden om niet te verdwijnen, moeten ook neurale verbindingen geprikkeld worden om te blijven bestaan of zich verder te ontwikkelen. Dat mechanisme speelt het sterkst in de eerste levensjaren. In de babyhersenen worden veel verbindingen aangemaakt. Wanneer informatie verwerkt wordt – de baby doet een nieuwe ervaring op of ervaart een emotie – leggen neuronen die gelijktijdig actief zijn, nieuwe onderlinge verbindingen aan of versterken bestaande verbindingen. Zijn cellen nooit of zelden tegelijkertijd actief, dan zal hun contact verminderen en hun onderlinge verbinding uiteindelijk verdwijnen. Dat resulteert in een efficiënt neuraal netwerk, dat sterk afhankelijk is van de omgeving waarin iemand wordt grootgebracht. Zo zullen bijvoorbeeld jonge kinderen die vaak verhaaltjes voorgelezen krijgen, sterkere verbindingen ontwikkelen in taalgebieden, wat leidt tot een grotere taalvaardigheid. Datzelfde mechanisme van versterken en snoeien in neurale verbindingen blijft – in tegenstelling tot wat men eerder dacht – levenslang in verschillende situaties functioneren. Het is bijvoorbeeld actief bij leren, onthouden, bij verandering in de omgeving en na fysieke schade aan de hersenen, als de hersenen proberen te compenseren voor verloren functies.

> Andere hersengebieden kunnen functies overnemen

Londense taxichauffeurs

Hoewel neuroplasticiteit eind negentiende eeuw al beschreven werd, verdween het idee daarna bij gebrek aan bewijs naar de achtergrond. Pas rond 1970 werden de eerste directe aanwijzingen gevonden bij katten en apen. Een echte doorbraak kwam eind jaren tachtig met de opkomst van moderne beeldverwerkingstechnieken zoals magnetische resonantie-imaging (MRI). Zo zagen Engelse wetenschappers in ervaren Londense taxichauffeurs een grotere hippocampus – een hersendeel dat een cruciale rol heeft in ruimtelijke oriëntatie – dan in minder ervaren collega's of in leken met een beperkte kennis van het Londense stratenplan. De grootte van de hippocampus zou beïnvloed worden door het gebruik van het ruimtelijk geheugen, dus door specifieke ervaring. Daarna volgden veel studies die vergelijkbare anatomische verschillen in de hersenen beschreven tussen experts en niet-experts, onder meer in muziek en sport.

In al deze studies werden experts met niet-experts vergeleken. Daardoor konden wetenschappers niet bepalen of de verschillen het gevolg waren van het oefenen van vaardigheden of van aanleg. Misschien hadden de ervaren taxichauffeurs die grotere hippocampus al voordat ze aan die baan begonnen.

Om meer over oorzaak en gevolg te kunnen zeggen, zijn studies nodig waarbij je de hersenverandering bij een persoon in de tijd volgt: een longitudinale aanpak dus. Op die manier ontdekten Duitse wetenschappers dat de hoeveelheid informatieverwerkende grijze stof toenam als jongeren twee maanden lang dagelijks het computerspel Super Mario 64 speelden. In drie hersengebieden bij jongvolwassenen kwam er meer grijze stof bij: in de hersengebieden die zorgen voor planning en besluitvorming, voor motorische coördinatie en voor ruimtelijke oriëntatie.

Hersenschade

Neuroplasticiteit is misschien wel het duidelijkst zichtbaar na hersenschade. Wanneer een bepaald hersengebied zijn oorspronkelijke functie niet

Oudere man die herstelt van een hersenbloeding, oefent met aankleden.

meer kan vervullen, kunnen andere hersengebieden dit soms overnemen. De violiste Martha Curtis die na vele epileptische aanvallen en enkele hersenoperaties nog steeds prachtig kon spelen, bleek bijvoorbeeld gebruik te maken van andere hersengebieden dan de gangbare. De snelheid waarmee de schade in de hersenen ontstaat, is hierbij van groot belang. Bij chronische, langzaam toenemende hersenschade – zoals bij traag groeiende hersentumoren – gaat het herstel beter dan bij acute of snel toenemende hersenschade, zoals bij hersenbloedingen en snelgroeiende hersentumoren. De hersenen hebben blijkbaar tijd nodig om zich te reorganiseren.

Onlangs hebben we bewijs gevonden dat de ontstaanssnelheid van hersenletsel invloed heeft op de gezonde hersenhelft van de patiënt: de functionele organisatie van gebieden én hun onderlinge samenwerking veranderde. Deze bevindingen komen niet overeen met het traditionele idee, dat hersenen zijn samengesteld uit zeer gespecialiseerde delen met elk één specifieke functie. Ze ondersteunen eerder het beeld van een netwerk waarin functies tot stand komen door neurale communicatie tussen hersengebieden. Enkel door het samenwerken van meerdere hersengebieden zijn mensen bijvoorbeeld in staat om taal te spreken of te begrijpen. Door dit soort bevindingen is de focus van het onderzoek aan het verschuiven naar plasticiteit. Wetenschappers kijken niet alleen naar plasticiteit binnen, maar ook tussen hersengebieden. Hoe zijn ze anatomisch met elkaar verbonden? En hoe werken ze samen?

Kunstmatige intelligentie

Dit netwerkperspectief biedt nieuwe uitdagingen en kansen. Zijn hersengebieden die een cruciale rol spelen binnen bepaalde neurale netwerken plastischer dan minder belangrijke gebieden? Dat soort dingen willen we graag weten. We kunnen ze onderzoeken met behulp van kunstmatige intelligentie (AI). We laten computers de relatie tussen diverse soorten hersenschade, het cognitief functioneren, de kwaliteit van leven en de overleving analyseren. Ze combineren daarbij grote aantallen hersenscans en andere data van patiënten. Mogelijk kunnen we daarmee beter achterhalen en voorspellen hoe het ziekteproces van een individuele patiënt zal verlopen en die patiënt al vooraf meer informatie geven over de gevolgen voor zijn of haar leven.

Ook zouden we met AI virtuele hersenoperaties kunnen uitvoeren en de gevolgen berekenen van het wegnemen of beschadigen van bepaalde verbindingen tussen hersengebieden. Zo kunnen we mogelijk de langetermijneffecten van bepaalde medische behandelingen vooraf inschatten, zoals het verwijderen van hersentumoren, en stoornissen beperken. Iedere patiënt krijgt dan de beste, gepersonaliseerde zorg.

Literatuurverwijzingen staan in de pdf-versie.

Het herstellend vermogen van de m

RON M.A. HEEREN

Met nieuwe technieken kun je het herstellende vermogen van de mens – van topsporter tot patiënt – meten. Dat geeft inzicht in de veerkracht van een individu.

Topsporters worden met bepaalde indicatoren continu gemeten. Een datagedreven voedings- en trainingsprogramma zorgt ervoor dat ze op het juiste moment excelleren. Het meten van het herstellend vermogen van het menselijk lichaam is daar een belangrijk onderdeel van. Maar hoe meet je dat? Dat kan door de melkzuurconcentraties in een druppeltje bloed of zweet vast te stellen met sensoren.

Melkzuur ontstaat na intens gebruik van grote spiergroepen in bijvoorbeeld de benen of armen. De stof speelt een rol bij inspanning en herstel en ontstaat als een spiercel samentrekt en glucose verbruikt. De zuurgraad in en rond de cel gaat dan omhoog, resulterend in de bekende spierpijn. De spier herstelt zich als het melkzuur tijdens en na het sporten omgezet wordt in glycogeen: de zuurgraad daalt, de spierpijn verdwijnt. Dit herstelmetabolisme is een essentieel deel van de veerkracht van een atleet: hoe sneller het spierherstel, des te groter de veerkracht. Atleten stemmen hun trainings- en voedingsprogramma af op de uitkomsten van de melkzuurmetingen. Ze kunnen dan precies voldoende dieetsupplementen gebruiken, zoals eiwitshakes, zonder dat hun gewicht toeneemt.

Trigger

Maar er wordt ook op andere manieren gemeten aan de mens en zijn veerkracht, bijvoorbeeld in de geneeskunde. Ons lichaam kan zichzelf herstellen: wonden sluiten, gebroken botten groeien weer aan elkaar. Het immuunsysteem bestrijdt indringers van buitenaf, zoals virussen en bacteriën, al of niet geholpen door een vaccin. Deze processen hebben allemaal een trigger nodig. Hoe weet het lichaam dat er een bot gebroken is of dat een virus het lichaam is binnengedrongen? Die processen worden lokaal gestart en moeten dus lokaal worden gemeten. Dat kan door specifieke tracers – bijvoorbeeld gelabelde glucose – in het lichaam te volgen. Daarmee kunnen onderzoekers meer inzicht krijgen in de signalen die het herstelproces in het lichaam reguleren.

Eén type cel is met name belangrijk in het onderzoek naar het zelfherstellende vermogen: de stamcel. Dat is een onrijpe, niet gespecialiseerde cel die kan uitgroeien tot talloze specifieke cellen, zoals een lever-, huid-, bot- of bloedcel. De stamcel zit overal in het lichaam, bijvoorbeeld in het beenmerg, de huid en de darmen. Haar ontwikkeling tot gespecialiseerde cel krijgen we steeds beter onder controle. Daarbij bestuderen we de processen op het niveau van één enkele cel. Met de juiste sturing wordt het mogelijk om de cellen van een persoon te gebruiken om weefsel te repareren dat door ziekte of een ongeval is afgestorven. Dat vergroot dus de veerkracht van die patiënt.

Het nieuwste instrument waarmee biologen en biomedische onderzoekers metingen aan de mens

ens precies gemeten

Hoe sneller het spierherstel, des te groter de veerkracht.

kunnen verrichten, zijn organoïden oftewel mini-orgaantjes. Die maken het mogelijk om aan de mens te meten, zonder aan de mens te meten, dus buiten het lichaam. Zo worden organoïden van de huid bijvoorbeeld ingezet om te kijken welke signalen het weefselherstelproces in de huid het best in gang zetten. Ook worden ze gebruikt om de werking van medicijnen te testen. Zo blijven de innovaties elkaar opvolgen en krijgen we steeds meer inzicht in de individuele gezondheid en veerkracht van zowel topsporters als patiënten.

4 Kantelpunten in klimaat- en ecosystemen

Soms bereiken systemen een kantelpunt: de rek is eruit, het systeem slaat om naar een nieuw – niet altijd beter – evenwicht en sleept andere systemen mee. De ijskappen op de Noordpool smelten, bos wordt savanne, savanne wordt woestijn. Toch is er ook hoop.

Opwarming kan kettingreactie klimaatveranderingen veroorzaken

De huidige opwarming van de aarde kan ervoor zorgen dat belangrijke klimaatsystemen onstabiel worden. Van de ijskappen op de Noordpool en Groenland tot de oceaancirculatie: als er eentje kantelt, kan de rest worden meegesleept, met onvoorspelbare gevolgen.

BREGJE VAN DER BOLT

Na drie extreem droge zomers, werden we afgelopen zomer in Nederland verrast door periodes van extreme regenval. Die zorgden voor veel problemen in Limburg en delen van Duitsland en België. Ook in andere delen van de wereld neemt het aantal extreme weersgebeurtenissen toe. Daarnaast brak ook een groot stuk van een van de ijskappen op Groenland af, werd de oceaancirculatie zwakker en warmt de Noordpool op in een tempo vergelijkbaar met abrupte overgangen van een koude naar een warme periode uit eerdere ijstijden.

Deze gebeurtenissen zijn signalen dat het klimaat aan het veranderen is. Ze brengen een groot risico met zich mee: de kans dat systemen die het klimaat beïnvloeden – ijskappen, oceaancirculatie – een kantelpunt bereiken. Ze kunnen abrupt veranderen, waardoor er een nieuwe situatie ontstaat. Delen van de zee kunnen bijvoorbeeld plotseling zuurstofloos worden, waardoor daar vrijwel geen vissen meer kunnen leven. Wanneer een systeem kantelt, heeft dat ook effect op andere onderdelen van het klimaat, denken sommige onderzoekers. Ze vrezen voor een cascade van grote en onvoorspelbare klimaatveranderingen.

Kantelpunten

Dat sommige klimaatsystemen een kantelpunt kunnen bereiken, is al enige tijd bekend. Maar wat is precies een kantelpunt? De verschillende klimaatsystemen zijn normaal in evenwicht. Een

De oppervlakte van het zee-ijs van de Noordpool krimpt door de stijgende temperaturen.

systeem dat in evenwicht is, kan verstoringen goed opvangen. Wanneer het een jaar wat warmer is, smelt er wat meer zee-ijs. Dat groeit in de winter gewoon weer aan. Maar de stijgende temperaturen op aarde veranderen nu dat evenwicht. Soms bevindt een systeem zich in de buurt van een kantelpunt en kan een kleine verandering, zoals een zomer met hoge temperaturen, het systeem over de rand heen duwen. Het systeem gaat dan naar een nieuw – vaak ongewenst – evenwicht. Een bos verandert dan bijvoorbeeld in een grasland, of een helder meertje in een groene algensoep. Zo'n kantelpunt vindt plaats doordat er een sterke, positieve terugkoppeling optreedt in het systeem: de ogenschijnlijk kleine verstoring wordt versterkt, waardoor een grote verandering optreedt. Zit een systeem ver van een kantelpunt af, dan kan het verstoringen goed opvangen: het heeft een hoge veerkracht. Naarmate het systeem naar het kantelpunt toe beweegt, vangt het verstoringen steeds slechter op en neemt de veerkracht af.

Positieve terugkoppelingen

Een voorbeeld van zo'n mogelijke, sterke, positieve terugkoppeling in het klimaat is de ijsalbedo-feedback. Het zee-ijs van de Noordpool heeft, wit als het is, een hoge albedo: het weerkaatst veel zonlicht. Maar door de stijgende temperaturen wordt het dunner en wordt de donkere oceaan eronder zichtbaar. Bovendien krimpt de oppervlakte van het zee-ijs. De oceaan weerkaatst het zonlicht een stuk minder goed dan het witte ijs. Als het zee-ijs dunner wordt en het ijsoppervlak afneemt, wordt er dus minder zonlicht weerkaatst en meer warmte opgenomen. Daardoor stijgt de temperatuur van de aarde – en smelt er weer meer zee-ijs.

Op Groenland gebeurt iets soortgelijks. Daar

smelt het landijs, de donkerder ondergrond weerkaatst minder licht en er wordt meer warmte opgenomen. Bovendien speelt daar nóg een positieve terugkoppeling: de dikte en dus de hoogte van de ijskappen neemt af door de opwarming van de aarde. Daardoor stijgt de temperatuur op de ijsberg – hoe dichter bij zeeniveau, des te hoger de temperatuur – en smelt er nog meer ijs.

Verschillende andere klimaatsystemen hebben mogelijk ook zo'n kantelpunt, waarna een positieve terugkoppeling het systeem overneemt. We weten echter niet precies wanneer deze kantelpunten overschreden worden en hoeveel de aarde daarvoor moet opwarmen. Het klimaat kent namelijk veel verschillende terugkoppelingsmechanismen. Sommige versnellen het proces, terwijl andere het juist vertragen. Omdat al deze terugkoppelingsmechanismen invloed op elkaar uitoefenen, is het lastig om precies te bepalen hoe een systeem reageert op een verandering. Door die complexiteit is het moeilijk om het netto-effect te bepalen van de interacties die we kennen. Bovendien ontbreekt er nog kennis over het klimaatsysteem: we kennen niet alle terugkoppelingsmechanismen en interacties in en tussen de verschillende klimaatsystemen.

> Naarmate het systeem naar het kantelpunt toe beweegt, vangt het verstoringen steeds slechter op

Zwakkere oceaanstroming

Juist dit laatste zou voor nog meer onverwachte veranderingen kunnen zorgen. Wat als het kantelen van één klimaatsysteem zorgt voor het overschrijden van een kantelpunt in een ander klimaatsysteem? Wat gebeurt er bijvoorbeeld als er door het afsmelten van de Groenlandse ijskappen in één keer een grote hoeveelheid zoet water in de oceaan terechtkomt waardoor de Golfstroom – die warm water vanuit de tropen naar de Noordpool brengt en koud water vanuit de Noordpool naar de tropen – zwakker wordt en als gevolg daarvan over zijn eigen kantelpunt wordt geduwd? Onderzoek op kleinere schaal laat zien dat zulke kettingreacties kunnen plaatsvinden in ecosystemen.

Zulke kettingreacties zijn moeilijk met computermodellen na te bootsen, omdat het niet duidelijk is welke systemen kantelpunten hebben, hoe sterk de verbanden tussen de verschillende klimaatsystemen zijn en in welke volgorde de veranderingen plaatsvinden. Zo brengt de Golfstroom warm water vanuit de tropen naar de noordelijke wateren, wat bijdraagt aan het smelten van de ijskappen. Op het moment dat de oceaanstroming als eerste kantelt, stopt deze stroming, waardoor de kans afneemt dat de ijskappen op Groenland volledig verdwijnen.

En nu?

Het is moeilijk om met computermodellen aan te tonen dat er kantelpunten in klimaatsystemen zitten. De interacties zijn complex en we kennen niet alle interacties en mechanismen in het klimaatsysteem. En anders dan met sommige ecosystemen kunnen we met klimaatsystemen geen experimenten doen. Er is dan ook veel discussie tussen wetenschappers. Er is twijfel over het bestaan van kantelpunten in klimaatsystemen. Sommigen denken dat de vele terugkoppelingsmechanismen ervoor zullen zorgen dat het systeem in evenwicht blijft.

Ondanks de controverse stelt het laatste internationale klimaatrapport dat abrupte veranderingen en kantelpunten in klimaatsystemen niet kunnen worden uitgesloten. Het risico dat er kantelpunten worden overschreden en de mogelijke kettingreactie die dat als gevolg heeft, zijn nog geen reden tot paniek. We kunnen nog voorkómen dat de klimaatsystemen uit evenwicht raken. We moeten echter niet wachten totdat we precies weten welke klimaatsystemen kantelpunten hebben en waar ze liggen, want die informatie komt misschien te laat. Gezien de grote mogelijke gevolgen is het beter om het zekere voor het onzekere te nemen en zo snel mogelijk de emissies van broeikasgassen te stoppen. Dat is misschien niet een hele spannende of verrassende oplossing, maar het is wel de veiligste manier om een kettingreactie te voorkomen.

Bos behoudt regen, regen behoudt bos

Tropische bossen, zoals het Amazoneregenwoud, zijn bestand tegen branden en andere verstoringen, onder andere doordat het bos zijn eigen regen maakt. Maar die veerkracht komt steeds meer onder druk te staan door klimaatverandering en ontbossing.

ARIE STAAL

Een visser meert zijn bootje aan bij de oever van een zijtak van de Amazone, de grootste rivier op aarde. Het is lunchtijd en de visser bereidt zijn vers gevangen vis op een vuurtje. Wanneer hij klaar is maakt hij het vuur uit, maar realiseert zich niet dat het blijft smeulen. Later, als hij een eind verderop weer aan het vissen is, ziet hij de brand om zich heen grijpen.

Steeds vaker komt in het nieuws dat er ergens grote stukken bos in brand staan. Zelfs in tropische bossen, ondanks de vaak erg vochtige omstandigheden daar. Maar het is er niet altijd en overal even nat, en in sommige gebieden zijn er steeds meer droogtes door klimaatverandering. Daardoor neemt de vatbaarheid voor vuur toe, al dan niet aangestoken. De afgelopen jaren hebben er tienduizenden branden in de Amazone plaatsgevonden. Alleen al in 2020 verbrandde een gebied half zo groot als Nederland.

Bestand tegen brand

Hoe goed is een tropisch bos bestand tegen brand? De bomen zelf kunnen heel slecht tegen vuur. Regenwoudbomen hebben er tijdens hun evolutie namelijk weinig mee te maken gehad. Desondanks hoeft een verbrand stuk bos niet voorgoed verloren te zijn. Als het met rust wordt gelaten, kan het zich vaak herstellen. Maar brand kan ook veranderingen teweegbrengen die de veerkracht verminderen. Er kunnen bijvoorbeeld meer grassen gaan groeien. Die horen thuis in de savanne en komen in een gesloten tropisch bos doorgaans weinig voor. Maar in een open, verbrand stuk bos kunnen grassen voet aan de grond krijgen, en omdat ze brandbaarder zijn dan bomen, vergroot dat de kans op een tweede brand. Het vermogen van het bos om een stootje te verdragen – de veerkracht dus – is afgenomen.

De veerkracht hangt ook af van het klimaat. Hoe meer vocht de lucht en het bos bevatten, des te

Het Amazonegebied maakt, dankzij zijn grote omvang en dichte bebossing, zelf regen.

minder brandbaar is het bos. Het herstel na een brand gaat beter naarmate het natter is. Met deze vochtigheid is iets bijzonders aan de hand: ze komt mede van het bos zelf. Bomen hebben, zoals alle planten, water nodig om te groeien. Ze nemen het op via hun wortels en verdampen het weer via de bladeren. Bomen nemen extra veel water op; met hun diepe wortels kunnen ze er nog bij als het bovengronds relatief droog is. Daarmee zorgen ze voor een constante vochttoevoer naar de lucht. Die raakt verzadigd, waardoor het eerder en meer zal regenen. De regen gaat de bodem in en kan weer opgenomen worden door boomwortels en afgegeven door een nieuwe boom die vervolgens groeit, en zo gaat de cyclus voort.

Hoe weten we hoeveel regen de bossen zelf veroorzaken en waar die terechtkomt? Daarvoor gebruiken we modellen die verdamping, regenval en windrichtingen en -snelheden simuleren, op basis van meetgegevens, onder meer van satellieten. Daarmee kunnen we inschatten hoeveel water er van plek naar plek is vervoerd door de lucht.

Er is bos doordat er bos is

Door deze modellen begrijpen we dat vooral het Amazonegebied, dankzij zijn grote omvang en dichte bebossing, zelf regen maakt. Waterdamp blijft gemiddeld meer dan een week in de lucht voordat het vloeibaar wordt en neerregent. De afstand tussen de plek van verdamping en die van regenval is vaak honderden, soms duizenden kilometers. De Amazonerivier is duizenden kilometers lang, dus een druppel kan meermalen opnieuw verdampen binnen de regio. Gemiddeld is ongeveer een derde van de regenval in het hele Amazonegebied 'hergebruikte' regen: hoe verder landinwaarts, des te groter de hoeveelheden. In het westen, tegen het Andesgebergte aan, is zelfs het merendeel van de neerslag afkomstig van het Amazonegebied zelf. Als er op de route landinwaarts minder bomen waren, zou er landinwaarts minder regen zijn. Er is daar dus bos doordat er bos is! Dat zorgt voor veerkracht: als een stuk bos bijvoorbeeld afbrandt, kan het zich herstellen dankzij andere delen van het bos. Daarbij helpen niet alleen zaden van vlakbij, maar dus ook die regenval van een heel stuk verderop.

Open vuur kan ook een tropische bos in lichterlaaie zetten.

Domino-effect

Maar de medaille heeft een keerzijde. Als er bos wordt gekapt en gebruikt voor laten we zeggen veehouderij, dan verdwijnt daarmee niet alleen de biodiversiteit en de koolstofopslag van het bos, maar ook de regen. Dat zal het gebied verderop dus net een stukje droger maken en daarmee vatbaarder voor branden. Hier komen de verschillende mechanismen die samenhangen met het bos – vuur en regen – samen. Ontbossing op de ene plek kan de veerkracht van het bos op de andere plek verminderen.

Daardoor kon er een domino-effect optreden: een bepaald deel van het bos (een dominosteentje) verdwijnt door kap of vuur en geeft dan minder water af aan de lucht. Honderden kilometers

verderop kan dit net de ontbrekende druppel zijn, waardoor het volgende dominosteentje net iets te vatbaar is voor brand. En zo gaat het ene na het andere steentje omver. Zoals er bos is doordat er bos is, zo kan er dus ook bosverlies zijn doordat er bosverlies is. We begrijpen nog niet goed genoeg waar, wanneer en in hoeverre dit domino-effect plaatsvindt. Met behulp van wiskundige modellen proberen we dat te onderzoeken. We moeten nog veel ontdekken, maar we weten al wel dat de negatieve gevolgen van klimaatverandering en ontbossing elkaar kunnen versterken. Willen we de veerkracht van tropische bossen behouden, dan zullen we die bossen zélf zo veel mogelijk moeten behouden.

Op de klimaattop van 2021 in Glasgow hebben de wereldleiders afgesproken ontbossing per 2030 helemaal te stoppen. Ongelukjes zoals die van onze visser zullen we daarmee niet kunnen voorkomen, maar als we de tropische bossen en hun veerkracht in stand houden, kunnen de gevolgen wel binnen de perken blijven.

Natuur in stad past zich snel aan

Het zal niet lang meer duren en dan leeft driekwart van alle mensen op aarde in steden. Daarbuiten is veel ruimte nodig voor landbouw. Waar gaat de natuur dan naartoe? Naar de stad, zo blijkt uit steeds meer onderzoek. En daar past de natuur zich aan met een snelheid waar Charles Darwin niet van had durven dromen. Een nauw verweven web van wilde stadsplanten en -dieren kan, mits lang genoeg met rust gelaten, uitgroeien tot een ware stadsjungle.

BARBARA GRAVENDEEL

Exotische stadsplanten zijn van alle tijden. Aanvankelijk werden ze aangeplant. Tegenwoordig vestigen plantensoorten zich op eigen kracht in de Nederlandse steden, gemiddeld met zo'n zeven nieuwe soorten per jaar. Het gros daarvan is ooit uit tuinen 'ontsnapt'. Maar er zitten ook mediterrane soorten, tussen die ons land op eigen kracht weten te bereiken. Door de wereldwijde opwarming kunnen zij hun verspreidingsgebied stap voor stap uitbreiden. Exotische planten worden na verloop van tijd opgenomen in het lokale voedselweb. Dat bestaat uit een mix van op elkaar afgestemde inheemse en exotische soorten.

Stadsjungle

Zo'n nauw verweven web van wilde stadsplanten en -dieren kan, mits met rust gelaten, na verloop van tijd uitgroeien tot een stadsjungle. Net als in een natuurlijke jungle zijn grote oude bomen daarbij heel belangrijk. In hun kronen leven veel andere soorten, waaronder mossen en korstmossen, schimmels, insecten, vogels en slakken. Die worden weer gegeten door andere soorten.

Die onderlinge afstemming van inheemse en exotische soorten kost tijd. Van de hier genoemde exotische soorten leeft de plataan inmiddels het langst in ons land: meer dan honderd jaar geleden werden de eerste exemplaren in onze steden aangeplant. Ze doen het goed in de volle zon op sterk

versteende stadspleinen. Veel inheemse soorten profiteren er nu van: ze eten ervan of groeien erop.

Het scheefbloemwitje is een van de recente nieuwkomers. Tot 2008 leefde deze vlinder uitsluitend op berghellingen in de Alpen. Maar toen werd de scheefbloem, waar deze dagvlinder zijn eieren op afzet, populair in Europese tuincentra. De vlinder ontdekte daarop rotstuintjes als nieuw leefgebied. En omdat er meerdere generaties per jaar zijn, kon de soort zich daarna razendsnel noordwaarts verspreiden.

Bestuiving, water en geluk

Een hecht web van wilde stadsplanten en -dieren is onmisbaar voor bestuiving van gewassen in volkstuintjes, voor helder water, om fijn stof op te vangen en lawaai te dempen, en nog veel meer. Hoe hoger de soortendiversiteit, hoe meer zo'n web kan leveren, en hoe meer nieuwe soorten het kan opnemen. Ook maakt een diverse stadsjungle de menselijke stadsbewoners aantoonbaar gelukkiger.

In 2050 zullen we met tien miljard mensen zijn. Die moeten allemaal ergens wonen en eten. Het oppervlak aan natuurlijke jungles slinkt als gevolg daarvan in rap temp. Nooit eerder werden er zoveel wilde planten- en diersoorten met uitsterven bedreigd door activiteiten van de mens: een miljoen. Planten maken daarvan vier procent uit. Maar juist planten houden onze planeet leefbaar. Grote bomen zorgen voor schaduw en verlagen plaatselijk de temperatuur tijdens hittegolven. En met veel planten beschermen we onszelf tegen levensbedreigende ziektes als kanker en coronavirussen. Van de naalden van de inheemse venijnboom worden chemokuren gemaakt en extracten uit de bast van de Chileense zeepbastboom worden al eeuwenlang gebruikt om de afweer te verhogen. Nu vormen ze een belangrijk bestanddeel van het Novavax-vaccin tegen het coronavirus dat Covid veroorzaakt.

Als de natuurlijke jungles verdwijnen, is de stadsjungle straks wellicht nog de enige plek op aarde waar geneeskrachtige planten te vinden zijn voor onze evolutionaire wapenwedloop met nieuwe ziektes. Dan moeten we onze stadsjungles wel de kans geven om uit te groeien tot zo'n divers soortenweb. Dat betekent dat ze niet telkens weer slachtoffer moeten worden van projectontwikkelaars met kettingzaag en sloophamer. Zo'n verandering in het denken, van de korte naar de lange termijn, vergt moed. Maar voor het voortbestaan van onze eigen soort is dat van levensbelang.

Een halsbandparkiet plukt de vruchten van een venijnboom.

Dagboek van een

07:00

Halsbandparkieten die in een oude plataan tegenover mijn huis hebben overnacht, vliegen onder luid gekrijs op. Ze gaan ontbijten in een venijnboom verderop vol rijpe vruchten. De exotische halsbandparkiet heeft zich de afgelopen 25 jaar sterk uitgebreid in de Randstand. Het is een sociale soort die in grote groepen leeft.

08:00

Op de stam van diezelfde plataan jagen twee boomkruipers op larven van de zuidelijke schorsloper en plataanridderwants. Beide insecten zijn specialisten: hun larven lusten uitsluitend plataan. De volwassen insecten zijn hun waardplant achterna gereisd en vormen nu een welkome eiwitbron voor inheemse boomkruipers. Af en toe verdwijnen de vogels even onder de blaadjes van een Chinese kamperfoelie, die op drie meter hoogte in een holte tussen de takken groeit. Die is hier opgekomen nadat de halsbandparkieten elders bessen van die plant hadden gegeten en hier, in hun slaapboom, de zaden uitpoepten.

11:00

Een blauwe reiger vangt in de sloot tegenover mijn huis een rode Amerikaanse rivierkreeft. Deze kreeftensoort is 35 jaar geleden in Nederland geïntroduceerd. Reigers en snoeken leren inmiddels om volwassen rivierkreeften te vangen. Omdat deze soorten niet in groepen jagen, leren ze langzamer dan halsbandparkieten.

11:15

De kauwen die in de schoorsteen op het dak van de buren broeden, hebben een schaar van de rivierkreeft bemachtigd. Het mannetje slaat de schaar met zijn snavel doormidden op de rand van een dakgoot. Beneden vangt het vrouwtje behendig de andere helft op en eet het kreeftenvlees. Kauwen leven, net als halsbandparkieten in grote sociale groepen. Daardoor leren ze snel van elkaar welke nieuwkomers in de stadsjungle wel en niet eetbaar zijn.

stadsjunglebewoner

12:00

In het rotstuintje van mijn buurvrouw zet een scheefbloemwitje eieren af op de bladeren van scheefbloemen. Dat is al de tweede keer dit jaar.

16:00

Pats! Een sperwer vangt een Turkse tortel, die in de achtertuin naar zaden van het purpervi-ooltje aan het zoeken was. Het eerste tortelpaartje broedde in 1950 in Nederland. Net als in hun oorspronkelijke leefgebied zoeken deze vogels overal op de grond naar plantenzaden. Daar profiteert het purpervioolje van, dat spontaan ontkiemt onder klimplanten waarin de tortels broeden. In onze steden zie je steeds meer sperwers jagen. Ze zijn er veilig door afwezigheid van hun voornaamste vijand, de havik, die alleen in oud bos broedt.

21:00

In de schemering jaagt een gewone dwergvleermuis boven de plataan op muggen en plataanvouwmotten. Die motten zijn weer specialisten die de waardplant achterna zijn gereisd en een plek in het lokale voedselweb hebben verworven.

24:00

In het plantsoen achter mijn huis snuffelt een hongerige egel aan een afgevallen plukje eikenmos onder een Amerikaanse eik, in de hoop daar slakjes in te vinden. De eerste Amerikaanse eiken werd 125 jaar geleden in Nederland geïntroduceerd. Veel inheemse korstmossen, waaronder eikenmos, hebben zich op deze soort gevestigd. In de stad bevat eikenmos minder afweerstoffen dan in natuurgebieden, waardoor het meer energie overhoudt voor groei en voortplanting. Dat is cruciaal in een omgeving waar bomen zelden oud worden, maar het maakt stedelijk eikenmos ook kwetsbaarder voor slakkenvraat. In een stadsjungle met voldoende oude eikenbomen zal het mos zijn afweerstoffenproductie weer opvoeren, zo is de verwachting.

Onverwachte veerkracht door ruimtelijke patronen

Ecosystemen blijken veerkrachtiger te zijn dan lang werd gedacht. Ze vormen soms nieuwe ruimtelijke patronen en kunnen daarmee het overschrijden van kantelpunten voorkomen.

MAX RIETKERK

Biologen denken vaak dat ecosystemen in twee stabiele, relatief onveranderlijke toestanden kunnen verkeren, waarvan de ene plotseling kan omslaan in de andere: een gezonde, wenselijke toestand bereikt een kantelpunt en gaat over in een gedegradeerde, onwenselijke toestand. Denk aan een tropisch regenwoud dat door bosbranden en houtkap verandert in een savanne, of een savanne die door overbegrazing of klimaatverandering verwordt tot woestijn.

Twee stabiele toestanden kunnen echter makkelijk naast elkaar bestaan binnen hetzelfde gebied. Tropisch regenwoud naast savanne, of savanne afgewisseld met kale grond. Dat maakt het aannemelijk dat kantelpunten minder vaak voorkomen dan tot dusverre werd gedacht. Het is immers niet een heel gebied dat kantelt van de ene toestand naar de andere, maar slechts een klein gedeelte daarvan. Beide toestanden kunnen kennelijk stabiel naast elkaar blijven bestaan.

Ook kunnen ecosystemen veel meer stabiele toestanden aannemen dan twee. We noemen dat multistabiliteit. Die toestanden komen vaak naast elkaar voor en vormen samen herkenbare regelmatige of onregelmatige ruimtelijke patronen. Ecosystemen passen zich op die manier goed aan de nieuwe omstandigheden aan en ontwijken daarmee kantelpunten. Zo komen savannes aan de randen van woestijnen en regenwouden in allerlei regelmatige en onregelmatige ruimtelijke patronen voor. Ze zijn daar decennialang stabiel, ook al verandert de regenval.

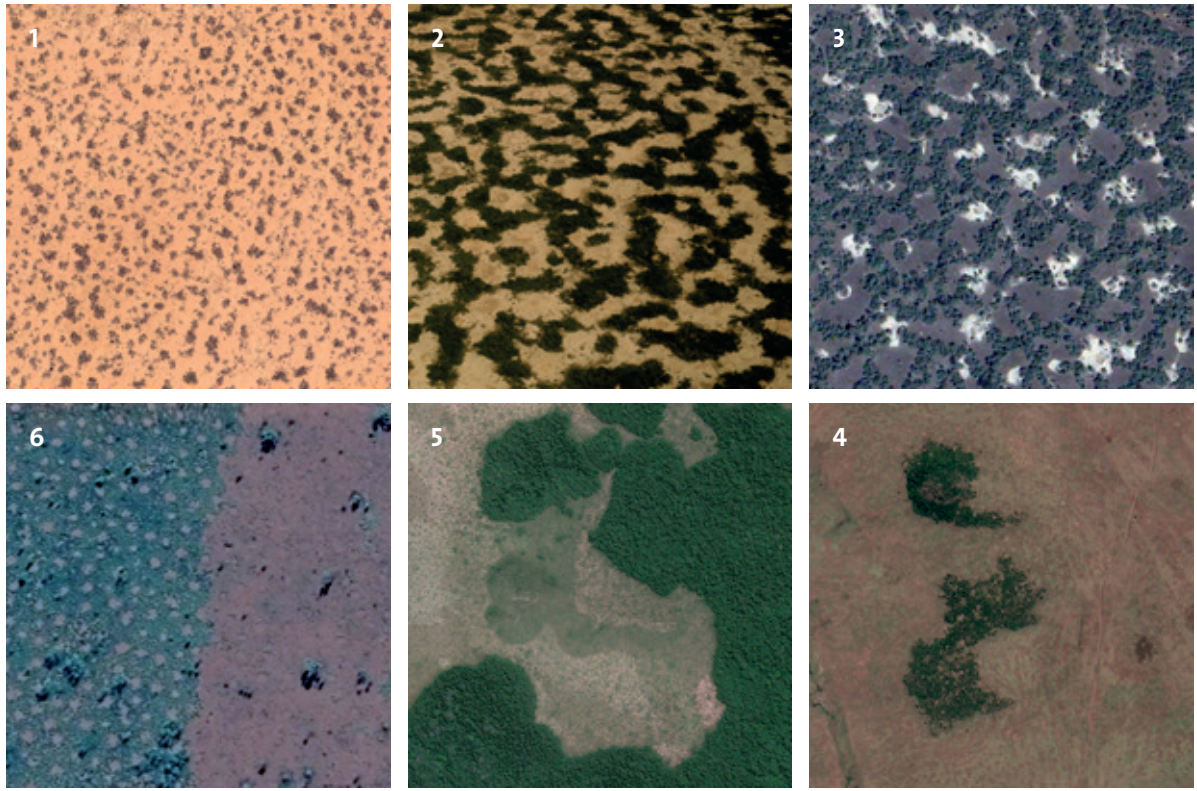
Turingpatronen

Er zijn twee typen ruimtelijke patronen te onderscheiden. De regelmatige turingpatronen – vernoemd naar de Engelse wiskundige Alan Turing die ze als eerste voorspelde – en de onregelmatige co-existentiepatronen. De turingpatronen ontstaan wanneer een homogeen ecosysteem – een aaneengesloten stuk bos of savanne, bijvoorbeeld – door een verstoring uiteenvalt in vegetaties die van boven gezien lijken op stippen, strepen, labyrinten of gaten. De co-existentiepatronen bestaan uit twee verschillende stabiele toestanden, maar in dit geval afwisselend naast elkaar in hetzelfde gebied met scherpe grenzen daartussen, bijvoorbeeld een tropisch regenwoud afgewisseld met savanne.

Deze nieuwe inzichten zijn tot stand gekomen door wiskundige modelstudies en satellietwaarnemingen en hebben recent geleid tot een aanpassing van de kantelpunttheorie. Wetenschappers dachten eerder dat turingpatronen een voorbode waren voor kantelpunten en dus een indicatie voor de kwetsbaarheid van het ecosysteem. Bij het kantelpunt zouden de stippen of strepen met vegetatie verdwijnen en zou een complete homogene woestijn ontstaan.

Kantelpunten omzeilen

Maar deze patronen blijken juist voor veerkracht te zorgen: ze maken het mogelijk kantelpunten te omzeilen. Het ecosysteem past zich zodanig aan dat het binnen de omstandigheden of parameterruimte blijft die in de wiskunde de ‘busseballon’ wordt genoemd, vernoemd naar de Duitse natuurkundige Friedrich Busse. Als bijvoorbeeld de regenval afneemt, blijft de vegetatie toch bestaan. Het aantal stippen of strepen past zich aan en vormt een nieuwe regelmaat. Niet de hele vegetatie verdwijnt, maar slechts enkele stippen of strepen. Ook kunnen zich door plaatselijke verstoringen onregelmatige co-existentiepatronen vormen,



Google Earth-beelden van turingpatronen, co-existentiepatronen en een combinatie daarvan. Van linksboven met de klok mee: turingpatroon (stippen) van savanne en kale bodem in Sudan, turingpatroon (labyrint) van savanne en kale bodem in Niger, turingpatroon (labyrint) van bomen en grasland in Mali, co-existentiepatroon van bos en grasland in Kenya, co-existentiepatroon van tropisch regenwoud en savanne in Gabon, co-existentiepatroon van kale grond en savanne met turingpatroon (gaten) in Australië.

waarbij twee stabiele toestanden naast elkaar kunnen blijven bestaan. Veranderen de omstandigheden, dan kunnen die vervolgens weer uiteenvallen in regelmatige turingpatronen.

Meer leidt tot nóg meer

Maar hoe werkt dat dan? En waardoor kunnen ecosystemen veerkrachtiger zijn dan gedacht? Kantelpunten kunnen optreden door positieve terugkoppelingen – veranderingen die automatisch leiden tot een nog snellere verandering in dezelfde richting. Anders gezegd: meer leidt tot nóg meer, of minder tot nóg minder. Denk aan het verschijnsel dat vegetatie water aantrekt: hoe meer vegetatie, hoe makkelijker regenwater in de bodem infiltreert en daar wordt vastgehouden, waardoor er nóg meer vegetatie groeit, enzovoort. Dezelfde positieve terugkoppeling werkt ook de andere kant op: minder vegetatie, de bodem houdt minder water vast, waardoor er nóg minder vegetatie overleeft, totdat er uiteindelijk een woestijn overblijft. Zo kan een positieve terugkoppeling dus tot kantelpunten leiden.

Negatieve terugkoppelingen daarentegen doen iets anders: ze vertragen of dempen veranderingen. Ze leiden dus tot stabiliteit en veerkracht. Daarvan is bijvoorbeeld sprake wanneer te veel planten op een kluitje elkaars groei remmen omdat ze dezelfde bron – water, licht – delen. Komt er een verstoring – begrazing of vuur – dan worden ze uitgedund en groeien planten weer naar een bepaald evenwicht toe. Dit is een verandering in tegengestelde richting: minder leidt tot meer, of meer leidt tot minder.

De schaalafhankelijke terugkoppeling geeft stabiliteit en veerkracht

Kleine en grote schaal

De turingpatronen ontstaan door het tegelijk optreden van een positieve terugkoppeling op kleine schaal en een negatieve terugkoppeling op grotere schaal. Neem een savanne aan de rand van de woestijn. Planten kunnen niet de hele oppervlakte begroeien, want daarvoor is er te weinig water. Daar waar al vegetatie is, infiltreert het water goed in de bodem, dus daar kan ook weer makkelijk vegetatie bijgroeien – een positieve terugkoppeling. Maar juist daardoor wordt het extra droog op de onbegroeide plekken, aangezien er zoals gezegd niet genoeg water is voor het hele gebied. Dat bemoeilijkt dus de groei van vegetatie op de tot dusverre onbegroeide plekken – de negatieve terugkoppeling.

Deze zogenoemde schaalafhankelijke terugkoppeling geeft stabiliteit en veerkracht. Door de negatieve terugkoppeling ontstaat er een soort 'waterbedeffect'. Zo'n verandering in tegengestelde richting heeft namelijk óók tot gevolg dat afname van vegetatie op de ene plek leidt tot toename van vegetatie op de andere plek, even verderop. Schaalafhankelijke terugkoppeling is een algemeen mechanisme dat veel voorkomt in ecosystemen. Niet alleen in savannes, maar ook in koraalriffen, veengebieden, graslanden, zeegrassen en kwelders. De ruimtelijke beschikbaarheid van water kan een drijvende kracht zijn, maar ook de verspreiding van nutriënten zoals stikstof en fosfaat en andere voedingstoffen. Turingpatronen zijn dan ook een veel voorkomend verschijnsel in de natuur.

Scherpe grens

Onregelmatige co-existentiepatronen zijn wellicht nog algemener dan turingpatronen, omdat ze al gevormd kunnen worden door veelvoorkomende plaatselijke verstoringen zoals vuur of begrazing. Zo kan bijvoorbeeld een savanne die door vuur in stand wordt gehouden, bestaan naast een tropisch regenwoud dat niet kan branden bij gebrek aan droog gras. Op die manier kan er een scherpe grens blijven bestaan. Dat wijst erop dat ecosystemen die tot nu toe gevoelig geacht werden voor kantelpunten, in feite veerkrachtiger zijn. Anderzijds hoeft patroonvorming het optreden van kantelpunten niet uit te sluiten. Het is daarom van belang om de omstandigheden waaronder kantelpunten al dan niet optreden verder te onderzoeken.

Dit alles geldt niet alleen voor ecosystemen, maar ook voor andere complexe systemen: zoals de warme Golfstroom, de ijskappen op de polen en zelfs de aarde als geheel. Ook zij reageren mogelijk op veranderingen met positieve en negatieve terugkoppelingen en ruimtelijke patroonvorming. Elk complex systeem dat relatief groot genoeg is ten opzichte van de schaal van de ruimtelijke patronen die het kan vormen, kan mogelijk ook kantelpunten ontwijken. De vraag is nu: voor welke complexe systemen geldt dat, op welke ruimtelijke schaal? En voor welke niet?

THEORIE VAN KANTELPUNTEN

De curve geeft de toestanden van het ecosysteem weer. De onderbroken lijn geeft onstabiele toestand aan.

In de **rode pijl** is aantasting van het ecosysteem te zien en in de **groene pijlen** het herstel. Dubbele pijlen staan voor grote verschuivingen in het ecosysteem, enkele pijlen staan voor kleine veranderingen.

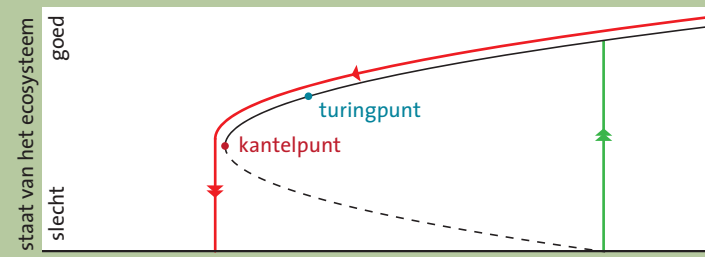
Volgens de gangbare theorie (A) zijn **turingpatronen** een voorbode van een kantelpunt. Daarna kunnen de ecosystemen niet meer terugkeren naar de originele toestand: eens woestijn altijd woestijn (geel).

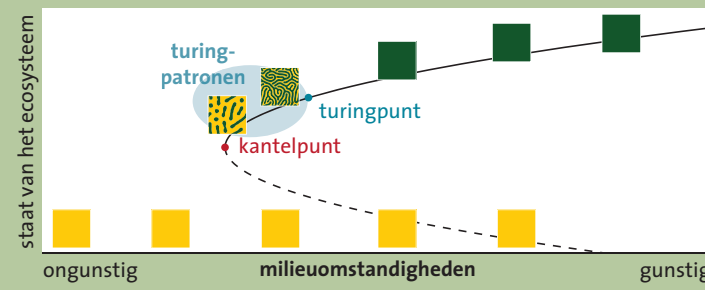
Onder toont de moderne theorie van multistabiliteit (B).

woestijn *begroeiing*

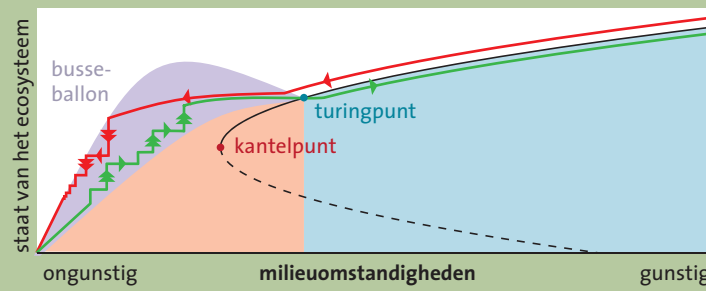
A. GANGBARE THEORIE

Turingpatronen zouden een voorbode zijn voor het bereiken van een kantelpunt, waarna de stabiele toestand omslaat naar een instabiele



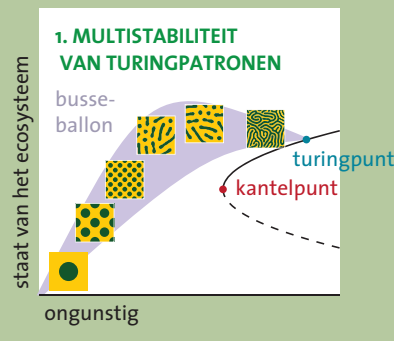


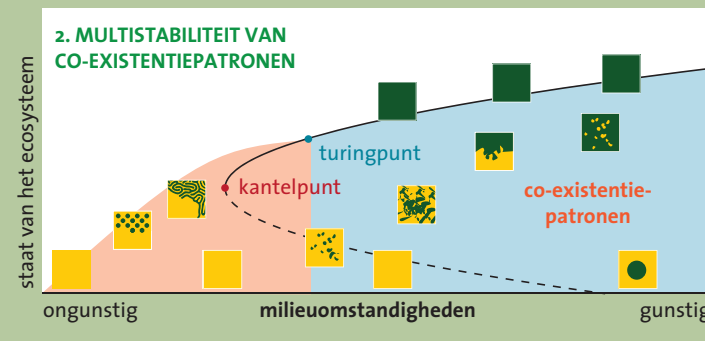
B. MULTISTABILITEIT



Via de zogenoemde busseballon worden de kantelpunten echter omzeild en vormt de vegetatie regelmatige patronen.

Ook in ongustige omstandigheden blijken regelmatige patronen toch mogelijk te kunnen zijn, wat duidt op veerkracht van het ecosysteem: het ecosysteem kan zich herstellen (**groene pijlen**)





Patroon en hersteltijd geven veerkra

MAX RIETKERK

Wetenschappers meten de veerkracht van ecosystemen door de grenzen van ruimtelijke patronen in kaart te brengen en de hersteltijden te volgen. Hoe langer de hersteltijd na een verstoring, des te geringer de veerkracht.

Vegetaties vormen ruimtelijke patronen. Ze groeperen zich in clusters – vanuit de ruimte zie je bijvoorbeeld regelmatige stippen of strepen – of ze bedekken de bodem met onregelmatige, abrupte afwisselingen van ecosystemen, zoals savanne en tropisch regenwoud. Satellieten als Sentinel en Landsat kunnen de ruimtelijke patronen registreren met een resolutie van respectievelijk tien en dertig meter.

Vertoont een ecosysteem regelmatige patronen – bijvoorbeeld een turingpatroon (zie voorgaande verhaal) – dan is dat een teken dat het veerkrachtig is en zich makkelijk aanpast aan een verstoring, zo hebben wetenschappers met wiskundige modellen en waarnemingen laten zien. Ook komen onregelmatige patronen voor, bijvoorbeeld abrupte afwisselingen van regenwoud en savanne. Ook dat is een teken van veerkracht. Het ecosysteem kantelt namelijk niet in zijn geheel van één homogene toestand naar een andere. Deze toestanden kunnen binnen hetzelfde gebied naast elkaar bestaan: een tropisch regenwoud naast een savanne, of een savanne naast een woestijn.

Vingers van een hand

De veerkracht van die toestanden kunnen onderzoekers verder analyseren door herhaalde waarnemingen te doen in de tijd. Daarbij kijken ze naar het opschuiven van vegetatiegrenzen (ook wel fronten genoemd) binnen de patronen. De verschillende toestanden die naast elkaar kunnen bestaan – zoals savanne en regenwoud of woestijn en savanne – kunnen elkaar namelijk ook verdringen. Rukt bijvoorbeeld de savanne op ten koste van de woestijn, dan wordt die eerste de indringer genoemd. Er bestaan technieken om aan de vorm van zulke fronten af te lezen in welke richting ze bewegen. Daaruit blijkt welke toestand – savanne of woestijn – de indringer is, en dus veerkrachtiger. Je ziet dan bijvoorbeeld dat de indringer een patroon vormt dat lijkt op vingers van een hand.

Deze techniek zou in principe ook toepasbaar zijn op de grenzen van zee-ijs. Ook die zijn te interpreteren als een onregelmatig patroon met een scherpe grens, aangezien het zee-ijs is omgeven door oceaanwater. Hiermee zou de veerkracht van het zee-ijs op een nieuwe manier kunnen worden gekwantificeerd. Tot nu toe wordt er alleen gekeken naar de oppervlakte van het ijs en niet naar de vormen van de grenzen tussen ijs en water.

Hersteltijd

Veerkracht kun je ook meten door de hersteltijd van een systeem na verstoring te bepalen: hoe korter de hersteltijd, hoe groter de veerkracht. Deze methode, waarvoor databestanden met tijdseries nodig zijn, wordt toegepast op diverse verschijnselen: het verloop van de biomassa of de populatiegroei in ecosystemen bijvoorbeeld, maar ook de temperatuur en het zoutgehalte in oceaanstromingen.

cht ecosystemen aan

Een abrupte overgang tussen een tropisch bos en een graslandschap.

De beschikbaarheid van data over voldoende lange perioden met korte tijdsintervallen zijn daarbij van groot belang. Een afname van de veerkracht van een systeem gaat gepaard met een vertraging van variabelen die de toestand aangeven. Met andere woorden: als een systeem wordt verstoord, duurt het langer om weer in de oorspronkelijke evenwichtssituatie te komen. Omdat er altijd natuurlijke of door de mens veroorzaakte verstoringen of fluctuaties in een systeem voorkomen, is aan de hand van tijdseries van toestandsvariabelen te meten hoe snel het systeem daarop reageert.

Afname veerkracht

Recentelijk is bijvoorbeeld in de warme Golfstroom een afname gevonden van zoutgehaltes en temperatuur én een vertraging van de fluctuaties daarin. Dat wijst op een verzwakking en een afname van de veerkracht van de Golfstroom. De data van zoutgehaltes en temperatuur van oceaanwater zijn ontleend aan verschillende onafhankelijke gegevensbestanden. De oudste gegevens zijn wel 150 jaar oud.

Ook is bijvoorbeeld de hersteltijd gemeten van ruim 2000 populaties gewervelde dieren tussen 1951 en 2017: zestig procent van de populaties is er langer over gaan doen om weer te herstellen, zo valt op te maken uit de database van The Living Planet Index van het Wereldnatuurfonds. De veerkracht van die populaties is dus wereldwijd afgenomen.

Vaak wordt een langere hersteltijd van een toestandsvariabele geïnterpreteerd als een voorbode van een kantelpunt. Maar dat hoeft niet zo te zijn. De toename van de hersteltijd is weliswaar een maat voor de afname van veerkracht van een systeem. Maar dat staat los van de vraag of het systeem gevoelig is voor een kantelpunt. Wetenschappers zijn nog steeds op zoek naar waarschuwingssignalen die aangeven hoe dicht een systeem een kantelpunt nadert. Daarmee zouden we een kantelpunt namelijk kunnen voorspellen. Helaas tasten we daarbij nog in het duister.

Veerkracht geeft hoop

RENÉ TEN BOS

De enorme aantrekkingskracht van het begrip veerkracht ligt in de kans op een tweede bestaan. Betekent dat dat je stressoren beter uit de weg kunt gaan, of moet je ze juist accepteren omdat je daarna beter kunt terugveren?

Veerkracht of weerbaarheid zijn doorgaans de woorden die we gebruiken om het Engelse *resilience* te vertalen. Er zit iets moois in al deze woorden, want ze bieden hoop. Zonder twijfel is dat ook de reden waarom ze zo in de mode zijn. Niet alleen in de wetenschap, zoals we in dit boek kunnen zien, maar ook in het bedrijfsleven en in de politiek heeft men het steeds weer over veerkracht.

Er gebeuren dingen in de wereld die ons met de neus op de kwetsbaarheid van alles drukken. In dit boek gaat het over ziekten, ecologische catastrofes en andere beangstigende dingen. Maar als dan toch, vaak op een verrassende manier, het gekwetste en beschadigde weer opveert, precies zoals een ingedrukte springveer ineens weer omhoog komt, dan vinden we dat mooi en zelfs ontroerend. *Resilire* is Latijn voor terugspringen. Er zit ook een verbinding met het minuscule: wat klein is, blijkt ineens toch groot te kunnen zijn. Wat ten dode opgeschreven was, blijkt bij nader inzien springlevend. Planten die geen licht krijgen en dreigen te verpieteren, bewegen richting het licht en dwingen zo een tweede kans af. De Duitse dichter Rainer Maria Rilke (1875-1926), zelf een uitermate kwetsbare man met een broze gezondheid, schreef ooit de volgende nogal bedenkelijke maar ook wel mooie regels:

'Voor iedereen één keer, slechts één keer. Eén keer en niet meer. En wij ook één keer. Nooit weer. Maar die ene keer er geweest zijn, ook al is het maar één keer: op deze wereld te zijn geweest, lijkt mij onherroepelijk.'

De dichter is dapper en put nog troost uit het feit dat hij die ene keer heeft bestaan voordat hij aan de vergetelheid prijs wordt gegeven. Maar zou hij hebben geweten van veerkracht? Dan zou hij hebben geweten dat dingen in zekere zin altijd een kans krijgen op een tweede bestaan. Daarin ligt de enorme aantrekkingskracht van veerkracht en daarover gaan alle verhalen in dit boek. Zelfs als het helemaal niet goed lijkt te gaan, zoals bij de kanoeten bij de Mauritanische kust, is er nog hoop dat er iets terugspringt of terugveert. Hoe duister de wereld niet alleen voor vogels maar ook voor ons kan worden, er is voor mensen die geloven in veerkracht nooit een reden om al het optimisme te laten varen.

Het gevaar trotseren

Vaak wordt gedacht dat veerkracht het vermogen van een individu of van een gemeenschap van individuen is om de schadelijke effecten van een stressor te reduceren of zelfs helemaal uit de weg te gaan. Die individuen of gemeenschappen kunnen menselijk of niet menselijk zijn, of zelfs anorganisch. Het handelingsvermogen is al lang niet meer voorbehouden aan mensen, maar wordt ook toegeschreven aan dingen en dieren.

Dat is belangrijk, maar belangrijker nog is dat men ziet dat achter de hier gekozen formulering – schade reduceren of uit de weg gaan – een

doorslaggevend verschil schuilgaat. Enerzijds lijkt er in de omschrijving van veerkracht een soort vluchtrepertoire te worden verondersteld. Dingen, dieren en mensen moeten gevaren uit de weg gaan. Niets is handiger voor wezens die slechts één keer leven, dan om in het zicht van gevaar de plaat te poetsen. Anderzijds lijkt het alsof je juist niet moet vluchten, maar het gevaar trotseren. Het mooie van een springveer is dat hij niet vlucht, maar het gevaar trotseert. Hij wordt ingeduwd, samengeknepen, tot kleinheid gedwongen – maar dan, je zou het niet verwachten als je hem ziet, springt hij toch terug en staat er weer. Vergelijk het met een voetbalwedstrijd: niets is mooier dan een underdog een schijnbaar hopeloze 0-2 achterstand te zien wegwerken. Maar – en dit is het punt – aanvankelijk moest die achterstand wel ondergaan en doorstaan worden.

Pandemie

De filosofische vraag laat zich dus als volgt formuleren: kun je stressoren beter uit de weg gaan of moet je ze juist accepteren omdat je dan beter terug kunt veren? Aan actualiteit heeft deze vraag geen gebrek. Een samenleving die zichzelf in het licht van een pandemie opsluit, kiest er nadruk-

Ouders die hun kinderen smerig laten worden, zijn eigenlijk hypermodern.

kelijk voor om de stressor, in dit geval een virus, uit de weg te gaan in de hoop dat die, bij gebrek aan zogenoemde 'gastheren', verdwijnt. Critici brengen daartegen in dat dit geen echte veerkracht is en dat je de mensen juist moet blootstellen aan de stressor in de hoop dat dat de lichamen juist robuust en sterk maakt. Dat kan op twee manieren worden bewerkstelligd, door ziek te worden of door vaccinatie. Vergelijk het met ouders die hun kinderen iedere dag in bad stoppen en ouders die het niet erg vinden als die kinderen af en toe smeerpoetsen zijn. Of vergelijk het met de mensen op het platteland van minder welvarende landen die meer infectieziekten moeten trotseren maar ook minder last hebben van auto-immuunziekten en allergieën. Onvatbaar zijn voor ziekten kan men dus door vlucht voor de stressor of het trotseren van de stressor bewerkstelligen. De discussies over wat de beste manier is, woekeren voort, maar veerkracht is nadrukkelijk iets wat je eerder met de tweede dan met de eerste optie verbindt.

Immuniteit

Het trefwoord – en het is een woord dat we ook in dit boek regelmatig tegenkomen, met name als het gaat om de meer medische discussies – is hier immuniteit. Het is misschien goed om er in deze epiloog op te wijzen dat het woord in pre-microbiële tijden een juridische betekenis had. Mensen die immuniteit verleend kregen, hoefden bepaalde plichten – het leger ingaan of belasting betalen – niet op zich te nemen. Ook kon de kerk politiek vervolgden 'immuniteit' verlenen door hen te beschermen tegen een dol geworden koning of keizer door hen bijvoorbeeld onder te laten duiken in een klooster. Zoiets lijkt natuurlijk wel wat op vluchten en is ook heel begrijpelijk. Het heeft weinig zin de machthebber te trotseren om vervolgens

op de marktplaats gevierendeeld te worden. Maar dat is politiek.

In de medische, ecologische of ook sociaal-economische wereld denkt men toch wat anders. De medische conceptualisering van immuniteit, die zo grofweg vanaf de 18de eeuw na Edward Jenners experimenten met het pokkenvaccin plaatsvond, zorgde ervoor dat de juridische connotatie meer en meer op de achtergrond kwam te staan. Je zou het een paradigmaverschuiving van de eerste orde kunnen noemen in ons denken over immuniteit. De jurist verbond immuniteit altijd met een soort bevrijding van iets waarvan je last zou kunnen hebben. Deze *immunia ab contagio* is het erom te doen iedere confrontatie met het besmettelijke – het *contagium* – te mijden. Lange tijd zou dit idee ook beklijven in filosofische en dichterlijke kring en werd ze bijvoorbeeld de basis voor een stoïcijns levensideaal dat er in bestond je niet al te veel aan te trekken van de ellende van het bestaan. Alleen door weg te kijken kon het zielenheil bewaard blijven.

Onder vuur

Maar die strategie van het uit de weg gaan of simpelweg vluchten is onder vuur komen te liggen en wordt inderdaad vervangen door confronteren en trotseren. Precies die pokkenexperimenten van Jenner laten dat mooi zien: kinderen moeten iets van de stressor, de ziekteverwekker, in zich opnemen om zo voor de lange termijn immuniteit of veerkracht tegen een gevaarlijke ziekte te ontwikkelen. Denk aan die ouders met hun smerige kinderen: ze zijn hypermodern!

Volgens de Italiaanse filosoof Roberto Esposito (geb. 1950) is de hedendaagse benadering van immuniteit gebaseerd op het idee dat de beste bescherming niet ontstaat door strenge uitsluiting van alle stressoren maar door strategische insluiting ervan. In feite betekent dit dat je wat beschermd moet worden eigenlijk een beetje moet blootstellen aan het gevaar door ziek worden of vaccineren, opdat de bescherming van het lichaam of een geheel volk of zelfs de natuur als zodanig op termijn beter wordt. Dat is de grote, wonderlijke en verbazingwekkende truc die achter veerkracht schuilgaat en die de harten van patiënten, medici, biologen, natuurbeschermers, dierenliefhebbers, bedrijfsmanagers en economen doet springen van hoop.

Auteurs

Dr. Wouter De Baene, universitair docent bij de afdeling cognitieve neuropsychologie, Universiteit Tilburg.
Prof. dr. Koos Biesmeijer, wetenschappelijk directeur Naturalis Biodiversity Center, hoogleraar Natuuriijk Kapitaal, Universiteit Leiden.
Dr. Bregje van der Bolt, Watersystemen en Klimaatverandering, Wageningen University & Research.
Prof. dr. René ten Bos, hoogleraar filosofie aan de Radboud Universiteit, Denker des Vaderlands 2017-2019
Dr. Koen van den Dries, onderzoeker en universitair docent bij de afdeling celbiologie van het Radboud Universitair Medisch Centrum.
Prof. dr. Jan van Gils, Trekvogelecologie in een snel veranderende wereld aan de Rijksuniversiteit Groningen en onderzoeker bij het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee.
Prof. dr. Barbara Gravendeel, hoogleraar plantevolutie aan de Radboud Universiteit en onderzoeker en groepsleider evolutionaire ecologie bij Naturalis Biodiversity Center.
Prof. dr. Ron Heeren, hoogleraar moleculaire beeldvorming, Universiteit Maastricht.
Dr. Ingrid van de Leemput, universitair docent bij de afdeling aquatische ecologie en waterkwaliteitsbeheer, Wageningen Universiteit & Research.
Dr. ir. Han A. Mulder, universitair hoofddocent fokkerij en genetica, Wageningen Universiteit & Research.
Dr. Teun Munnik, hoofd vakgroep Plantencelbiologie, Universiteit van Amsterdam.
Prof. dr. Ronald Pierik, hoogleraar fotobiologie, Universiteit Utrecht.
Dr. ir. Erik Poelman, Laboratorium voor Entomologie, Wageningen University & Research.
Dr. Raimond Ravelli, universitair hoofddocent structurele biologie bij de afdeling Nanoscopie, Universiteit Maastricht.
Prof. dr. Max Rietkerk, hoogleraar ruimtelijke ecologie en milieuverandering, Copernicus Instituut voor Duurzame Ontwikkeling, Universiteit Utrecht.
Prof. dr. Margriet Sitskoorn, hoogleraar klinische neuropsychologie bij de afdeling cognitieve neuropsychologie, Universiteit Tilburg.
Prof. dr. Hermelijn Smits, hoogleraar immuunmodulatie door gastheer-commensaal interacties, Leids Universiteit Medisch Centrum.
Dr. Arie Staal, universitair docent ecosysteemveerkracht, Copernicus Instituut voor Duurzame Ontwikkeling, Universiteit Utrecht.
Prof. dr. Christa Testerink, hoogleraar plantenfysiologie, Wageningen University & Research.
Prof. dr. ir. Ronald P. de Vries, groepsleider schimmelfysiologie bij het Westerdijk Fungal Biodiversity Institute in Utrecht en bijzonder hoogleraar moleculaire schimmelfysiologie, Universiteit Utrecht.

Prof. dr. Nic van der Wee, hoogleraar biologische psychiatrie, Leids Universitair Medisch Centrum.
Dr. Steven van der Werff, postdoc humane neurobiologie van veerkracht en stress, Leids Universitair Medisch Centrum.
Prof. dr. Maria Yazdanbakhsh, hoogleraar cellulaire immunologie van parasitaire infecties, Universiteit Leiden en hoofd van de afdeling parasitologie, Leids Universitair Medisch Centrum.
Dr. Mirjam Zegers, onderzoeker en universitair docent bij de afdeling celbiologie van het Radboud Universitair Medisch Centrum.

Meer informatie

Boeken

'Darwin in de stad, evolutie in de urban jungle', Menno Schilthuizen, Atlas Contact, 2018.
Reinette Biggs, Maja Schlűter, Michael L. Schoon, Cambridge University Press, 2015

Rapport

'Werken met veerkracht, voor duurzaam beheer van de grote wateren', Marjolein Sterk, Koen Kaffener, Joost Backx, Rob Buiter, Edwin Peeters, Rijkswaterstaat en Wageningen University & Research, 2022.

Video's

In twee korte animaties is uitgelegd hoe een ecosysteem zoals de savanne door verstoringen uit balans kan raken en hoe positieve en negatieve terugkoppelingen op verschillende schaalniveaus in de savanne kunnen werken. Ze zijn gemaakt door Anna van der Kaaden, illustrator (Anna mAKe) en promovenda bij het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ) en de Universiteit Utrecht.
https://bit.ly/3u4EgYX
https://bit.ly/3x8pouR

Website

Op de website Tipping Point Ahead leggen verschillende jonge klimaatonderzoekers uit wat kantelpunten zijn en hoe ze kunnen werken. De site bevat ook lesmateriaal voor middelbare scholieren: tippingpointahead.nl

Illustratieverantwoording

Cover: iStockphoto

Martijn Beekman / ANP Foto: p. 3
Henk van Ruitenbeek Illustraties, Wageningen: p. 5
Shutterstock: p. 6-7, 8, 12, 14, 19, 30, 49, 53, 58, 63 r, 71, 72
Anna Haeger en Peter Friedl (Radboudumc): p. 15
Rocky Mountain Laboratories, NIAID, NIH: p. 21
iStockphoto: p. 22-23
Ronald P. de Vries, Westerdijk Fungal Biodiversity Institute: p. 25
Ronald Pierik en Christa Testerink, bron plantmoves.nl: p. 27
Jasper Lamers, bron plantmoves.nl: p. 28
Maite Fernández de Bobadilla: p. 34
Erik Poelman, WUR: p. 35
Ron Heeren, Maastricht University: p. 37
iStockphoto: p. 38-39, 56
Erik Meesters: p. 41
Jan van de Kam Natuurfotograaf, Griendtsveen: p. 44
Amaury Miller / ANP Foto: p. 47
Mafalda / Alamy Stock Photo / Imageselect: p. 51
Biosphoto / F1online / Imageselect: p. 54-55
David Vilaplana / Alamy Stock Photo / Imageselect: p. 59
Dreamstime: p. 61
Ton Dopp / Buiten-beeld / ANP Foto: p. 62
Gerrit Huigen / waarneming.nl (CC-BY-NC-SA): p. 63 l
Google Earth: p. 65
Nigel Dickinson / Alamy Stock Photo / Imageselect: p. 69

Dit cahier is mede tot stand gekomen door:

In dit nummer:

- Veerkrachtige cellen
- Hoe organismen zich aanpassen
- Leven in een sterk veranderende omgeving
- Kantelpunten in klimaat- en ecosystemen
- Epiloog

REDACTIECOMMISSIE
Annette de Deugd
Ellen van Donk
Roy Erkens
Marjolein Sterk

REDACTIE
Astrid Smit

In 2020 en 2021 hebben we ervaren hoe belangrijk veerkracht is. Telkens moesten we meebewegen met de golven van de coronavarianten. Die veerkracht blijven we nodig hebben want ook de klimaatverandering en de veranderende oost-west verhoudingen stellen ons op de proef.

Maar wat is veerkracht eigenlijk precies? Hoe gaan cellen, organismen en ecosystemen om met druk en verstoringen? En wanneer beginnen zij te piepen en te kraken, wanneer zijn de grenzen van hun veerkracht bereikt? Daarover vertelt een breed scala aan wetenschappers in dit biocahier – van celbiologen en hersenwetenschappers tot ecologen en klimaatwetenschappers.

Op alle biologische niveaus blijken aanpassing, variatie, flexibiliteit, risicospreiding en tolerantie de kernmechanismen van veerkracht te zijn. Cellen, organismen en ecosystemen steken niet alle energie in een strategie of een mechanisme, maar spreiden hun kansen.

Maar soms bieden al deze mechanismen geen oplossing meer. De druk of stress is te groot of er zijn te veel verstoringen tegelijk. De rek is eruit: het biologisch systeem bereikt een kantelpunt en slaat om naar een nieuw evenwicht. Er is dan vaak geen weg meer terug. En dan kan het ene systeem het andere meeslepen. Toch is er ook hoop en blijken biologische systemen veerkrachtiger dan wetenschappers tot nu toe dachten.

BEKIJK DIT THEMA OP ONZE WEBSITE

bio wetenschap+ maatschappij

9 789493 232044