

1

HET GROTE GEHEEL

1 INLEIDING, OVERZICHT EN SAMENVATTING

Het leven is waarschijnlijk het meest complexe en diverse verschijnsel in het heelal; het manifesteert zich in een immense verscheidenheid aan vormen, functies en gedrag op een bijna onuitputtelijk aantal schalen. Er leven naar schatting meer dan acht miljoen verschillende soorten op onze planeet¹, in grootte variërend van de kleinste bacterie met een gewicht van nog geen biljoenste gram tot het grootste dier op aarde, de blauwe vinvis, die meer dan 100.000 kilo weegt. Wie een tropisch regenwoud in Brazilië bezoekt vindt op een oppervlak ter grootte van een voetbalveld meer dan honderd verschillende soorten bomen en miljoenen insecten die samen duizenden soorten vertegenwoordigen. En denk aan de verbazend verschillende manieren waarop al die soorten leven, hoe verschillend iedere soort wordt verwekt, geboren wordt, zich voortplant en sterft. Veel bacteriën leven maar een uur en hebben maar een tiende biljoenste watt nodig om in leven te blijven, terwijl walvissen meer dan een eeuw oud kunnen worden en een energieverbruik hebben van enkele honderden watt.² Bij dit ingewikkelde weefsel van biologisch leven komen nog de verbazingwekkende complexiteit en diversiteit van het sociale leven dat wij mensen hebben ontwikkeld, met name in de vorm van steden en alle opmerkelijke verschijnselen die daarbij horen, variërend van handel en architectuur tot de diversiteit van culturen en de ontelbare verborgen vreugden en zorgen van hun bewoners.

Wie dit complexe arsenaal vergelijkt met de opmerkelijke eenvoud en ordening van de planeten die rond de zon draaien of de feilloze werking van ons horloge of onze iPhone, vraagt zich bijna vanzelf af of er achter al deze complexiteit en diversiteit misschien een soortgelijke ordening schuilgaat. Is het denkbaar dat er een paar eenvoudige regels bestaan waaraan alle organismen – en zelfs alle complexe systemen – gehoorzamen, van planten en dieren tot steden en bedrijven? Of is alles wat zich afspeelt in bossen, graslanden en steden over de hele wereld volstrekt willekeurig en grillig, niet meer dan een reeks toevallige opeenvolgende gebeurtenissen? Gezien de toevallige aard van het evolutieproces waaruit al deze diversiteit is ontstaan, lijkt het misschien onwaarschijnlijk en tegen onze intuïtie dat er een regelmaat of een systematisch gedrag zou zijn ontstaan. Tenslotte zijn al die afzonderlijke organismen die de biosfeer vormen, ieder onderdeel ervan, ieder orgaan, ieder celtype en ieder genoom, geëvolueerd onder invloed van natuurlijke selectie in zijn eigen unieke niche en volgens een unieke geschiedenis.

Neem de grafieken in de figuren 1-4. In iedere grafiek is een grootheid waarmee we vertrouwd zijn en die een belangrijke rol speelt in ons leven uitgezet tegen een volume. In de eerste is de stofwisseling – de hoeveelheid voedsel die dagelijks nodig is om in leven te blijven – uitgezet tegen het gewicht of de massa van een aantal dieren. De tweede grafiek laat het aantal hartslagen gedurende een leven zien, eveneens uitgezet tegen het gewicht of de massa van een reeks dieren. In de derde grafiek zien we het aantal patenten dat in een stad wordt geproduceerd, uitgezet tegen haar inwonertal. En de laatste grafiek geeft het netto aantal goederen en inkomsten van beursgenoteerde bedrijven weer uitgezet tegen het aantal werknemers.

Je hoeft geen wiskundige, wetenschapper of expert te zijn op een van deze

Fig. 1 t/m 4 Voorbeelden van schaalkrommen die laten zien hoe grootheden schalen met een verandering in grootte: (1) illustreert hoe de stofwisselingssnelheid³ en (2) hoe het aantal hartslagen in een heel leven⁴ schalen met het gewicht van een dier; (3) laat zien hoe het aantal patenten dat in een stad wordt geproduceerd⁵ schaalt met het aantal inwoners; en (4) illustreert hoe activa en inkomsten van bedrijven⁶ schalen met het aantal werknemers. Merk op dat deze grafieken een reusachtige verscheidenheid aan schalen weergeven: zowel het gewicht van dieren als het aantal werknemers variëren met een factor van een miljoen (van muizen tot olifanten en van eenmanszaken tot supermarktketens en olie- en gasbedrijven). Om al deze dieren, bedrijven en steden in deze grafieken weer te kunnen geven neemt de schaal op iedere als telkens met een factor tien toe.

FIG. 1

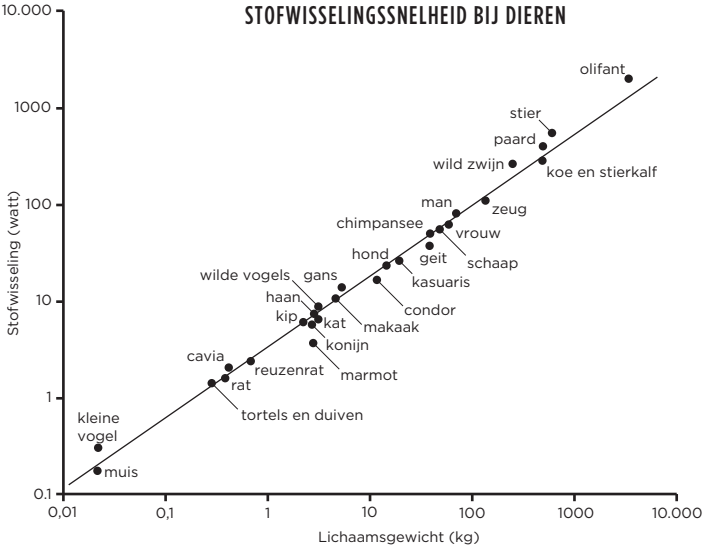


FIG. 2

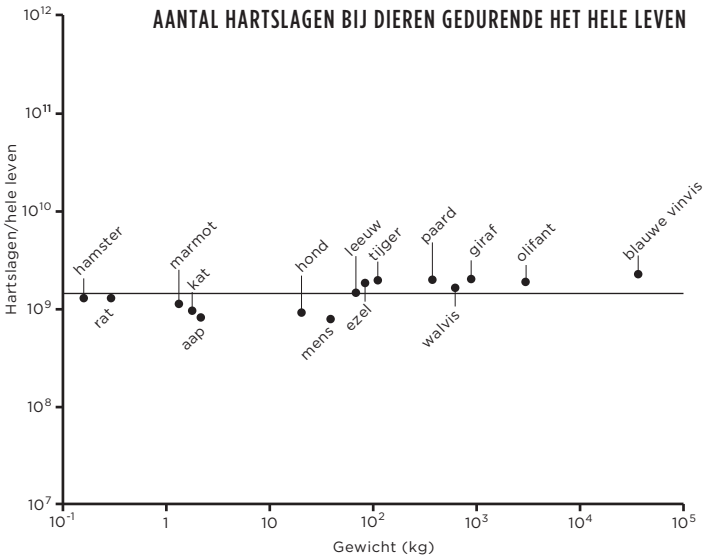


FIG. 3

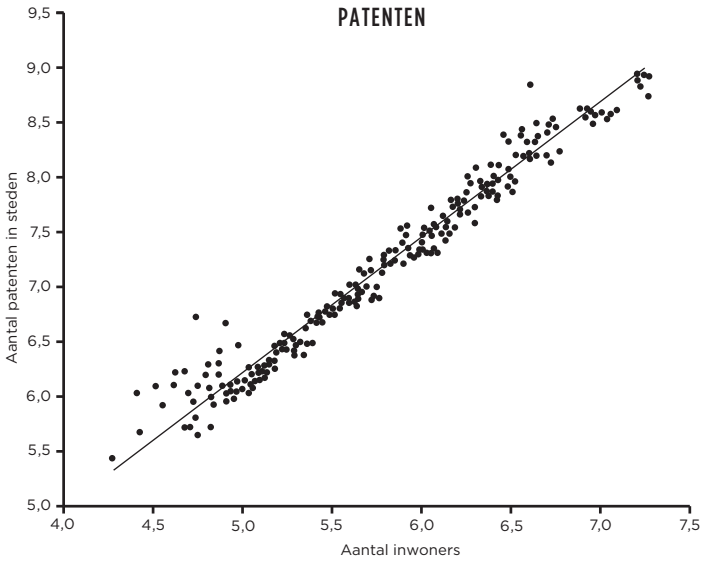
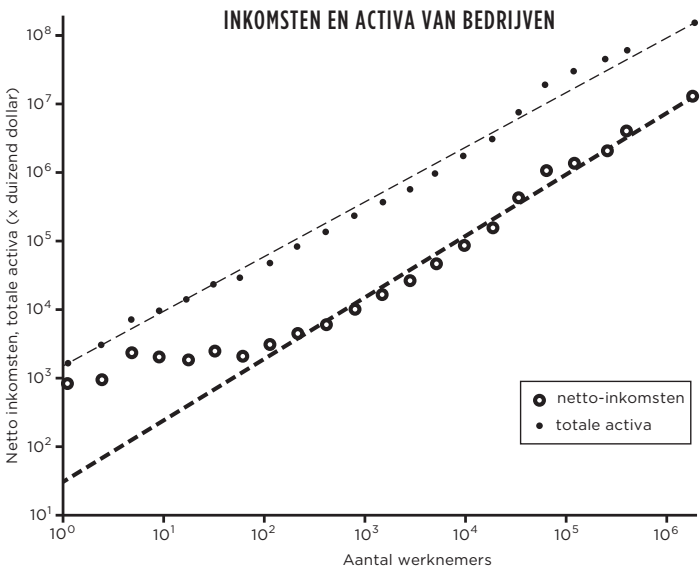


FIG. 4



terreinen om onmiddellijk te zien dat deze grafieken – ook al verbeelden ze enkele van de meest complexe en diverse processen die we in ons leven tegenkomen – een verrassende eenvoud, systematiek en regelmaat vertonen. Op een haast wonderbaarlijke manier vormen alle punten van de grafieken een vrijwel rechte lijn in plaats van een willekeurige verdeling zoals we misschien verwacht zouden hebben gezien de unieke historische en geografische bepaaldheid van ieder dier, elke stad of elk bedrijf. Het opvallendst is misschien wel figuur 2, waaruit blijkt dat het gemiddelde aantal hartslagen gedurende het leven van alle zoogdieren ongeveer gelijk is, ook al leven kleine dieren als muizen maar een paar jaar, terwijl grote dieren als walvissen honderd jaar of ouder kunnen worden.

De voorbeelden in de figuren 1-4 zijn maar een uiterst kleine greep uit een reusachtig aantal van zulke *schaalverhoudingen* die op een kwantitatieve manier beschrijven hoe bijna iedere meetbare eigenschap van dieren, planten, ecosystemen, steden en bedrijven *evenredig is* met hun grootte. In dit boek zullen we nog veel meer van zulke relaties tegenkomen. Het bestaan van deze opmerkelijke regelmatigheden suggereert onmiskenbaar dat er een gemeenschappelijk concept ten grondslag ligt aan al deze verschillende, hoogst complexe verschijnselen en dat de dynamiek, de groei en de organisatie van dieren, planten, menselijk sociaal gedrag, steden en bedrijven in feite onderworpen zijn aan overeenkomstige algemene ‘wetten’.

Dit is het voornaamste onderwerp van dit boek. Ik zal verklaren wat de aard en oorsprong van deze systematische schaalwetten is, hoe ze met elkaar te maken hebben en hoe ze leiden tot een diepgaand en breed begrip van een groot aantal aspecten van het leven en uiteindelijk tot het probleem om tot een duurzame wereld te komen. Samengevat bieden deze schaalwetten ons een blik op de onderliggende principes en ideeën die in potentie kunnen leiden tot een kwantitatief voorspellend kader waarmee een groot aantal essentiële vragen op allerlei terreinen van wetenschap en samenleving kunnen worden benaderd.

Dit boek gaat over een manier van denken, over het stellen van essentiële vragen, en over het suggereren van wezenlijke antwoorden op enkele van die grote vragen. Het geeft aan hoe enkele van de belangrijkste huidige problemen en kwesties – van razendsnelle verstedelijking, groei en mondiale duurzaamheid tot het begrijpen van kanker, metabolisme en de oorzaken van veroudering en dood – benaderd kunnen worden via een integraal conceptueel

kader. Het is een boek over de opvallend overeenkomstige manier waarop steden, bedrijven, tumoren en ons lichaam functioneren, en hoe ze stuk voor stuk een variatie vormen op een algemeen thema en qua organisatie, structuur en dynamiek een verrassend systematische regelmaat en overeenkomst vertonen. Een gemeenschappelijk kenmerk van al die variaties is dat ze uiterst complex zijn en uit reusachtige aantallen afzonderlijke elementen bestaan, of het nu gaat om moleculen, cellen of mensen, die onderling verbonden zijn, interactie plegen en zich via met elkaar verknoopte structuren ontwikkelen op een veelvoud van ruimtelijke en tijdelijke schalen. Sommige van deze netwerken zijn duidelijk en heel tastbaar, zoals ons bloedvatstelsel of het wengenet van een stad, andere zijn meer conceptueel of virtueel, zoals sociale netwerken, ecosystemen en internet.

Met behulp van het brede algemene kader kunnen we een groot aantal uiteenlopende vragen gaan bekijken; een aantal daarvan heeft mijn persoonlijke wetenschappelijke interesse gestimuleerd en andere zullen – soms speculatief – worden besproken in de hierna volgende hoofdstukken. Hier volgt een selectie:

- Waarom kunnen wij hooguit honderdtwintig jaar oud worden maar geen duizend of miljoen jaar? Waarom gaan we eigenlijk dood en welke factoren bepalen deze beperking van onze levensduur? Is de levensduur te berekenen aan de hand van de eigenschappen van cellen en complexe moleculen waaruit ons lichaam bestaat? Zijn die eigenschappen te veranderen en kan de levensduur worden opgerekt?
- Waarom leven muizen – die toch min of meer van hetzelfde materiaal gemaakt zijn als wij – maar twee tot drie jaar, terwijl olifanten vijfenzeventig jaar oud kunnen worden? En waarom is ondanks dit verschil het aantal hartslagen gedurende het hele leven voor olifanten, muizen en alle andere zoogdieren ongeveer gelijk, namelijk anderhalf miljard?⁷
- Waarom hebben organismen en ecosystemen, variërend van cellen en walvissen tot bossen een bepaalde grootte, en waarom is dat universeel, systematisch en voorspelbaar? Wat is de oorsprong van het magische getal 4 dat een groot deel van de fysiologie en biologie van groei tot dood lijkt te beheersen?

- Waarom stopt onze groei? Waarom moeten we iedere dag acht uur slapen? En waarom krijgen wij relatief gezien veel minder tumoren dan muizen, en komen ze bij walvissen vrijwel helemaal niet voor?
- Waarom blijven bijna alle bedrijven slechts een betrekkelijk gering aantal jaren bestaan terwijl steden blijven groeien en erin slagen om te ontsnappen aan het schijnbaar onvermijdelijke lot dat zelfs de krachtigste en ogenschijnlijk onkwetsbare bedrijven treft? Is het voorstelbaar dat we de levensduur van bedrijven ongeveer kunnen voorspellen?
- Kunnen we een wetenschap van steden en bedrijven ontwikkelen, dat wil zeggen een conceptueel model maken om de dynamiek, groei en ontwikkeling ervan kwantitatief te voorspellen?
- Bestaat er een maximumgrootte voor steden? Of een optimale grootte? Bestaat er een maximumgrootte voor dieren en planten? Zouden er reuzeninsecten en gigasteden kunnen bestaan?
- Waarom gaat het leven steeds sneller en waarom moet er steeds sneller worden geïnnoveerd om ons sociaaleconomische leven in stand te houden?
- Hoe zorgen we ervoor dat de door ons ontwikkelde systemen die pas tien-duizend jaar bestaan, kunnen blijven functioneren in harmonie met de biologische wereld die in de loop van miljarden jaren is geëvolueerd? Kunnen we een bruisende, innovatieve samenleving in stand houden die gedreven wordt door ideeën en het creëren van welvaart, of zijn we gedoemd om een planeet van sloppenwijken, conflicten en verwoesting te worden?

Ik wil zulke vragen vooral conceptueel en interdisciplinair benaderen; daarbij zal ik begrippen uit de biologie combineren met begrippen uit de sociale wetenschappen en economie; al neem ik wel de vrijheid om dat te doen vanuit het perspectief en door de ogen van een theoretisch fysicus. Daarom zal ik ook aantonen hoe datzelfde schaaldenken een vruchtbare rol heeft gespeeld bij het ontwikkelen van één universeel beeld van de elementaire deeltjes en de fundamentele natuurkrachten, inclusief hun kosmologische implicaties voor

de evolutie van het heelal sinds de oerknal. In die geest heb ik ook geprobeerd om – waar mogelijk – prikkelend en speculatief te zijn, maar vrijwel alles wat ik hier naar voren breng is op degelijk wetenschappelijk onderzoek gebaseerd.

Hoewel veel, zo niet alle resultaten en verklaringen in dit boek gebaseerd zijn op argumenten en afleidingen die geformuleerd zijn in de taal van de wiskunde, heb ik vakjargon vermeden en geschreven voor de spreekwoordelijke ‘intelligente leek’. Dat is nogal een uitdaging en betekent natuurlijk dat ik mij daarbij een zekere dichtelijke vrijheid moest veroorloven, en mijn wetenschappelijke collega’s zullen moeten proberen om niet al te kritisch te oordelen; misschien vinden ze dat ik de wiskundige en technische taal soms wat al te zeer heb vereenvoudigd. Voor wat meer wiskundig onderlegde lezers verwijs ik in de tekst steeds naar de vakliteratuur.

2 WE LEVEN IN EEN EXPONENTIEEL GROEIENDE SOCIAALECONOMISCHE VERSTEDELIJKE WERELD

Een van de belangrijkste onderwerpen van het boek is de essentiële rol die steden en mondiale verstedelijking spelen voor de toekomst van de planeet. Steden vormen de bron van de grootste problemen waarmee onze planeet wordt geconfronteerd sinds mensen in sedentaire gemeenschappen gingen leven. De toekomst van de mensheid en de duurzaamheid van de aarde op lange termijn zijn onlosmakelijk verbonden met het lot van onze steden. Steden vormen de smeltkroes van de beschaving, de centra van innovatie, de motor achter het scheppen van welvaart en de centra van macht, de magneten die creatieve individuen aantrekken en de prikkel tot ideeën, groei en vernieuwing. Maar ze hebben ook een schaduwzijde: ze vormen een broeinest van criminaliteit, vervuiling, armoede en ziekten, en de consumptie van energie en grondstoffen is er het grootst. Snelle verstedelijking en een steeds snellere sociaaleconomische ontwikkeling hebben talrijke wereldwijde problemen veroorzaakt, variërend van klimaatverandering en de invloed daarvan op het milieu tot beginnende voedsel- en energiecrises en een dreigend tekort aan water, crises op het gebied van volksgezondheid, financiële markten en de wereldeconomie.

Gezien dit dubbele karakter van steden als enerzijds de oorsprong van een

groot aantal van onze huidige problemen en anderzijds het reservoir van creativiteit en ideeën en dus de bron van de oplossing voor die problemen, wordt het hoog tijd om ons af te vragen of er een ‘urbanologie’, een ‘wetenschap van de stad’, mogelijk is en analoog daaraan een ‘wetenschap van bedrijven’; anders gezegd een conceptueel model om de dynamiek, de groei en de ontwikkeling ervan in een kwantitatief voorspelbaar model te vangen. Dat is essentieel voor het ontwerpen van een serieuze strategie om duurzaamheid op lange termijn te bereiken, in het bijzonder omdat omstreeks de tweede helft van deze eeuw de overgrote meerderheid van de mensheid in steden zal wonen, en de meerderheid daarvan in megasteden van ongekeerde omvang.

De huidige problemen, uitdagingen en bedreigingen zijn niet nieuw. We worden er al op zijn minst sinds het begin van de Industriële Revolutie mee geconfronteerd, en alleen door de exponentiële toename van de verstedelijking beginnen we nu het gevoel te krijgen van een dreigende tsunami die ons misschien zal overweldigen. Het is kenmerkend voor exponentiële groei dat de onmiddellijke toekomst steeds sneller dichterbij komt, en ons mogelijk voor onvoorziene problemen stelt waarvan we de dreiging pas erkennen als het te laat is. Daardoor zijn we ons pas betrekkelijk kortgeleden bewust geworden van de opwarming van de aarde, de milieuverandering op lange termijn, de eindigheid van energie, water en andere hulpbronnen, en de problemen van vervuiling en gezondheid, de stabiliteit van financiële markten enzovoort. En zelfs nu we ons zorgen beginnen te maken veronderstellen we stilzwijgend dat dit tijdelijke afwijkingen zijn die uiteindelijk zullen worden opgelost en verdwijnen. Het is daarom niet verrassend dat de meeste politici, economen en beleidsmakers er een tamelijk optimistische langetermijnvisie op na zijn blijven houden, en ervan uitgaan dat onze innovatie en vindingrijkheid zullen triomferen, zoals dat in het verleden inderdaad het geval was. Zoals ik verderop duidelijk zal maken, ben ik daar niet zo zeker van.

Bijna zo lang de menselijke soort bestaat, hebben de meeste mensen in een niet-stedelijke omgeving geleefd. Nog maar tweehonderd jaar geleden waren de Verenigde Staten overwegend agrarisch, en woonde nauwelijks vier procent van de Amerikaanse bevolking in steden; nu is dat meer dan tachtig procent. Dat is karakteristiek voor bijna alle ontwikkelde landen, zoals Frankrijk, Australië en Noorwegen, maar het geldt ook voor veel landen die als ‘ontwikkelings’-landen worden beschouwd, zoals Argentinië, Libanon en Libië. Tegenwoordig is geen enkel land op aarde minder dan vier procent verstedede-

lijkt; zelfs Burundi, misschien wel het armste en minst ontwikkelde land, is voor meer dan tien procent stedelijk gebied. In 2006 werd een opmerkelijke historische drempel overschreden, toen meer dan de helft van de wereldbevolking in stedelijke centra woonde; honderd jaar geleden was dat slechts vijftien procent en omstreeks 1950 nog steeds maar dertig procent. Naar schatting zal dat omstreeks 2050 vijfenzeventig procent zijn, als er nog eens meer dan twee miljard mensen naar de steden trekken, met name in China, India, Zuidoost-Azië en Afrika.⁸

Dat is een enorm aantal. Het betekent dat, gemiddeld over de komende vijf-entertig jaar, *iedere week* ongeveer anderhalf miljoen mensen naar de stad trekken. Om enig idee te krijgen wat dit inhoudt: vandaag is het 22 augustus; omstreeks 22 oktober zal er het grootstedelijke equivalent van een tweede New York op de planeet zijn bijgekomen, tegen Kerstmis nog een, en omstreeks 22 februari weer een enzovoort... Onontkoombaar zal er vanaf nu tot ver in de helft van de eeuw iedere twee maanden een stedelijk gebied ter grootte van New York bijkomen. En let wel: we hebben het hier over een stedelijke agglomeratie van New York, die vijftien miljoen mensen huisvest, niet over New York City, dat een bevolking heeft van slechts acht miljoen mensen.

Het verbijsterendste en meest ambitieuze urbanisatieprogramma op aarde is misschien wel dat van China, waar de regering hard op weg is om de komende twintig tot vijfentwintig jaar driehonderd nieuwe steden uit de grond te stampen, elk met meer dan een miljoen inwoners. In het verleden is China pas laat en langzaam verstedelijkt en geïndustrialiseerd, maar die verloren tijd wordt snel ingehaald. In 1950 was China voor nog geen tien procent verstedelijkt, maar waarschijnlijk zal het dit jaar de vijftig procent urbanisatie overschrijden. Bij het huidige tempo zal in de komende twintig tot vijfentwintig jaar het equivalent van de totale bevolking van de Verenigde Staten (meer dan driehonderdvijftig miljoen mensen) naar de stad trekken. En India en Afrika liggen niet erg ver achter. Het zal verreweg de grootste trek van mensen zijn die ooit op aarde heeft plaatsgevonden en die in de toekomst waarschijnlijk ook nooit meer geëvenaard zal worden. De daaruit voortvloeiende problemen met de beschikbaarheid van energie en hulpbronnen en de reusachtige druk op de wereldwijde sociale structuur zijn duizelingwekkend... en de tijd om ze op te lossen is uiterst kort. Iedereen zal er iets van merken; wegstijgen kan niet meer.

3 EEN KWESTIE VAN LEVEN EN DOOD

De ongelimiteerde exponentiële groei van steden staat in schril contrast met wat we zien in de biologie: de meeste organismen, inclusief wijzelf, groeien tijdens het jeugd stadium snel, daarna langzamer en ten slotte helemaal niet meer en uiteindelijk gaan ze dood. De meeste ondernemingen volgen een soortgelijk patroon, en uiteindelijk verdwijnen de meeste; maar met de meeste steden is dat niet het geval. Toch wordt er meestal in biologische termen geschreven over steden en bedrijven: er wordt gesproken over ‘het DNA van het bedrijf’, ‘het metabolisme van de stad’, ‘de ecologie van de markt’ enzovoort. Zijn dat alleen maar metaforen of zijn ze gebaseerd op harde wetenschap? In hoeverre zijn steden en bedrijven grote organismen, als ze dat al zijn? Ze zijn tenslotte ontwikkeld vanuit onze biologie en hebben dus een groot aantal eigenschappen gemeen.

Natuurlijk hebben steden eigenschappen die duidelijk niet biologisch zijn en daar zal ik later dieper op ingaan. Maar als steden inderdaad een soort superorganismen vormen, waarom gaan er dan bijna geen steden dood? Er zijn natuurlijk klassieke voorbeelden van dode steden, in het bijzonder zeer oude, maar dat zijn meestal uitzonderingen, het gevolg van conflicten en van de uitputting van het directe omringende milieu. In totaal vertegenwoordigen ze slechts een kleine fractie van alle steden die ooit hebben bestaan. Steden zijn opmerkelijk taai en de grote meerderheid ervan blijft bestaan. Denk aan het gruwelijke experiment zeventig jaar geleden, toen er op twee steden een atoombom werd gegooid; dertig jaar later bloeiden die steden weer. Het is buitengewoon moeilijk om een stad volledig te vernietigen. Het doden van dieren is daarentegen betrekkelijk gemakkelijk en van bedrijven gaat uiteindelijk de overgrote meerderheid ten onder, zelfs de sterkste en ogenschijnlijk onkwetsbare. Ondanks de voortdurende stijging van onze gemiddelde leeftijd in de afgelopen tweehonderd jaar, is onze maximumleeftijd niet veranderd. Niemand is ooit ouder geworden dan 123 jaar, en maar heel weinig bedrijven hebben erg veel langer bestaan – de meeste zijn na tien jaar ter ziele. *Waarom* blijven bijna alle steden levensvatbaar, terwijl de grote meerderheid van bedrijven en organismen overlijdt?

De dood is inherent aan alle biologisch en sociaaleconomisch leven: bijna alle levende wezens worden geboren, leven en sterven uiteindelijk, maar in tegenstelling tot geboorte en leven wordt de dood als serieus object van on-