

Thomas Swierts & Eline Bloois

Het machtigste leven op aarde



ALFABET UITGEVERS

2024

Even voorstellen

Ze leven op je neus, op je bord, onder je voeten en boven je hoofd. Microben zijn overal. Het zijn organismen die zo klein zijn dat je ze niet met het blote oog kunt zien. En zoals het gezegde luidt: uit het oog, uit het hart. Want de meeste mensen associëren microben met viezigheid en ziekte. Soms klopt dat ook, maar in de meeste gevallen doen microben ons geen kwaad. Sterker nog, we hebben ze keihard nodig. Zonder kunnen we niet. Het zijn de kleinste organismen op onze planeet, maar ook de machtigste. Zij hebben de wereld gemaakt tot wat die is; alles en iedereen kan bestaan dankzij die kleine organismen. Uiteindelijk begint en eindigt alles met microben.

Wij zijn Thomas Swierts en Eline van Bloois, collega's bij ARTIS-Micropia, het enige microbenmuseum ter wereld. We delen een passie om over de fascinerende wereld van microben te vertellen en zo een onzichtbare wereld zichtbaar te maken. Samen hebben wij dit boek geschreven waarin we proberen de wereld van microben zo toegankelijk mogelijk te beschrijven. We hebben veel aandacht voor verhalen die iedereen kent, maar waarvan vaak niet bekend is dat er meer speelt dan we kunnen zien, dat er nog een onzichtbare laag is van microben die bijdragen aan dit fenomeen. Kamelen die water vinden in de woestijn? De zuurstof die we inademen? De kleur van

korallen? Het eten dat we verteren? Het gif van kogelvissen? Het bestaat allemaal dankzij microben.

Maar wat is een microbe nou precies? Het is moeilijk een precieze definitie te geven, maar het omvat in ieder geval alle organismen die je niet met het blote oog kunt zien. Daarnaast zijn er ook nog een aantal organismen die je wel met het blote oog kunt zien, maar die we toch microben noemen. Microben zijn in te delen in verschillende groepen: bacteriën, archaea, algen, schimmels, microdiertjes en protisten.

Bacteriën en archaea zijn twee groepen organismen die veel op elkaar lijken, aangezien ze allebei altijd uit een enkele cel bestaan zonder duidelijk bouwplan. Alles drijft in die ene cel als een soepje door elkaar. Dit is kenmerkend voor prokaryoten. Dagelijks hebben we met bacteriën te maken. Zoals *Escherichia coli*, die veel in onze darmen voorkomt en vaak de poepbacterie wordt genoemd, of *Staphylococcus epidermidis* die in de huid leeft. Archaea zijn beter aangepast op extreme omstandigheden, maar dit betekent niet dat we ze nooit tegenkomen. Heb je weleens gezwommen in de Dode Zee? Daar leeft *Haloferox volcanii*, die speciaal is aangepast aan het hoge zoutgehalte.

Microben uit de groepen algen, schimmels, microdiertjes en protisten worden gekenmerkt door cellen waarin structuur zit; het DNA is netjes opgesloten in een celkern. Dit noemen we eukaryoten. Ook alle grotere en complexere levensvormen zijn eukaryoten, inclusief de mens.

Algen zijn kleine plantjes en kunnen energie uit zonlicht halen door middel van fotosynthese. Ze kunnen meercellig zijn, maar hebben geen complexe structuren zoals wortels, stengels of bladeren. Ze komen voor in de oceaan, in zoet water en zelfs in vochtige omgevingen op het land zoals een boomstam. Ook vlak bij huis kunnen we algen vinden, bijvoorbeeld *Haemato-*

coccus pluvialis die de veroorzaker is van de rode aanslag in een vogelbadje in de tuin.

Schimmels zijn een heel veelzijdige groep organismen. Er zijn eencellige schimmels zoals gisten die we gebruiken om brood te bakken en bier te brouwen. Maar de meeste schimmels zijn meercellig en maken mycelium, een netwerk van schimmeldraden. Vaak zie je dit mycelium niet omdat het onder de grond zit of in dood hout groeit, maar ook het donzige pluus op bedorven voedsel bestaat uit zulke schimmeldraden. Om zich voort te planten maken veel van die ondergrondse schimmelnetwerken paddenstoelen die omhoogschieten. Zo'n paddenstoel is het vruchtlichaam van de schimmel en zit vol met sporen die zich verspreiden en kunnen uitgroeien tot een nieuw schimmelnetwerk. Veel paddenstoelen zijn goed zichtbaar, bijvoorbeeld de vliegenzwam (*Amanita muscaria*), rood met witte stippen, of het elfenbankje (*Trametes versicolor*) dat vaak op loofbomen in het bos groeit. Ook champignons (*Agaricus bisporus*), oesterzwammen (*Pleurotus ostreatus*) en cantharellen (*Cantharellus cibarius*) zijn prima zichtbaar met het blote oog. Toch noemen we al deze organismen wel microben, omdat de individuele schimmeldraden zo dun zijn dat we ze niet met het blote oog kunnen zien.

Microdiertjes zijn microscopisch kleine diertjes. Ze zijn meercellig en hebben allerlei organen en lichaamsdelen, zoals een spijsverteringskanaal met een mond en een maag. Ook hebben ze een zenuwstelsel waarmee ze hun lichaam kunnen aansturen. Een van de kleinste dieren van allemaal zijn raderdiertjes (*Rotaria rotatoria*) waarvan de mannetjes maar 0,2 tot 0,3 millimeter groot worden.

Protisten vormen een beetje een rommelige groep. Het zijn eigenlijk alle eukaryote microben die in geen enkele andere

groep passen. Soms lijken ze sterk op algen, microdiertjes of schimmels, maar zijn ze dat technisch gezien niet. Net als algen zijn dinoflagellaten en diatomeeën bijvoorbeeld eencellige organismen die in het water leven en hun energie middels fotosynthese uit zonlicht kunnen halen. Doordat ze functioneel zoveel op algen lijken worden beide groepen voor het gemak vaak ook zo genoemd, zoals wij ook doen in dit boek, terwijl ze eigenlijk anders zijn opgebouwd en biologisch gezien geen planten zijn.

Andere voorbeelden van protisten zijn amoeben, pantoffeldiertjes (*Paramecium*) en de parasieten die malaria veroorzaken (*Plasmodium*). Een bijzondere protist is de slijmzwam (*Physarium polycephalum*), die ondanks de naam niets te maken heeft met schimmels. De slijmzwam is een eencellig organisme, maar je kunt hem wel gewoon met het blote oog waarnemen, bijvoorbeeld in een vochtig bos op een boomstronk. Een slijmzwam bestaande uit een enkele cel kan zich uitwaaiëren als een groot web van wel 20 centimeter breed. Het vreemde is dat slijmzwammen een bepaalde vorm van intelligentie hebben, terwijl ze hersenloos zijn. Onderzoekers hebben ze in een doolhof met voedsel geplaatst waarna ze in staat waren de kortste route naar het voedsel te vinden en te onthouden waar ze al geweest waren.

Microben komen in alle soorten en microscopisch kleine maten voor. Een beerdierdje kan bijvoorbeeld een halve millimeter groot worden, een heuse reus in de microbenwereld. Als je een beerdierdje op een glazen plaatje legt en het precies goed tegen het licht houdt, dan kun je nog net een stipje zien. Een bacterie daarentegen kan slechts een micrometer groot zijn, een miljoenste van een meter. Honderd keer kleiner dan de breedte van een mensenhaar. Het is niet makkelijk om je een

voorstelling te maken van zoiets kleins. Om een bacterie goed te kunnen zien heb je dan ook een goede microscoop nodig. Pas als je zo'n bacterie duizend keer vergroot kun je zien wat voor vorm deze heeft: een bolletje, een staafje, een spiraaltje of misschien wel iets heel anders.

De enorme diversiteit van microben is eigenlijk niet te vatten in één boek. Toch hebben we geprobeerd om in vogelvlucht door alle hoeken van de microbenwereld te reizen. We hebben de onderwerpen in vijf delen gegroepeerd.

Het eerste deel gaat over het ontstaan van het leven op aarde en de manier waarop microben de wereld zo hebben veranderd dat er complex leven kon ontstaan. Ooit was de wereld een plek waar de mens niet zou kunnen overleven, maar het zijn microben geweest die hem hebben getransformeerd tot de weelderig groene planeet waar we zo van houden.

Vervolgens laten we zien hoe microben de wereld van vandaag vormgeven. Hoe ze betrokken zijn bij weer en wind, aan de basis staan van de bijzonderste ecosystemen en verschillende kringlopen in de natuur compleet maken.

Daarna gaan we dieper in op de bijzondere relaties tussen microben en andere organismen. We bespreken hoe microben dicteren waar een walvis zwemt en een vogel vliegt. We laten zien hoe mieren voor sommige schimmels zorgen, terwijl andere schimmels mieren tot zombies maken. Het microbioom, de naam voor de verzameling van alle microben die een organisme met zich meedraagt, speelt een rol in alle facetten van het leven.

Het vierde deel gaat over de innige relatie die mensen hebben met microben. We zitten vol met ze, voor elke menselijke cel in ons lichaam huisvesten we ook een microbe. Ze maken ons eten en ze helpen ons dat eten te verteren. Ze kunnen ons ziek maken, maar ook weer beter. We wisselen microben uit terwijl

we zoenen en ze kunnen leiden tot nieuwe ideeën, inzichten, kunst en muziek.

In het laatste deel lichten we een aantal bekende en onbekende microbiologen uit die belangrijke ontdekkingen hebben gedaan die nog steeds worden gebruikt in microbiologisch onderzoek, zoals de petrischaal, en die ons dagelijks leven nog steeds beïnvloeden, zoals pasteurisatie en vaccins.

We proberen met dit boek microben in een wat positiever daglicht te plaatsen, maar zullen ook de duistere kanten niet schuwen. Met een beetje geluk vinden microben en hun wonderlijke wereld na het lezen van dit boek ook een plekje in jullie hart.

Voordat we beginnen willen we onszelf nog even voorstellen.

Thomas

Toen ik biologie ging studeren aan de Universiteit van Amsterdam deed ik dat om meer te leren over de grootste dieren en de imposantste natuurfenomenen. Microbiologie sprak me totaal niet aan; ik wilde leren over het gedrag van primaten, veldwerk doen in tropische regenwouden en duiken op kleurrijke koraalriffen. Tijdens mijn studie kwam ik er al snel achter dat microben een rol spelen in elk aspect van de biologie. Het bleek dat juist die kleine microben de imposantste en machtigste levensvormen op aarde zijn!

Als promotiestudent bij het museum Naturalis in Leiden onderzocht ik sponzen op koraalriffen. Maar sponzen zitten vol met microben die allerlei taken voor ze uitvoeren, en al snel was ik meer een microbioloog dan een mariene bioloog. Hoe meer ik over microben leerde, hoe fascinerender ze werden. Een

ontdekkingsreis door die ongrijpbare wereld van microben is op veel manieren wonderlijker dan een reis door de ruimte, en ik gun het iedereen zo'n reis te maken.

Die reis bracht mij in 2023 naar ARTIS-Micropia als hoofd van het museum. Op mijn eerste werkdag besloot ik alle museale opstellingen in het museum grondig te doorlopen om het museum van binnen en buiten te leren kennen. De eerste opstelling in het museum gaat over Antoni van Leeuwenhoek, en ik las het volgende lofdicht:

*Van welke wondren hangt de werelt aen malkander!
Sprak Leeuwenhoek, daer hy door 't heldere kykglas zagh,
En met een Linceus oog ontdekte, klaer en schrande,
Wat in de duisternis tot noch begraven lagh.*
— Hubert Korneliszoon Poot

De naam Poot herkende ik meteen. Twee jaar eerder kochten mijn zes maanden zwangere vrouw en ik een tweedehands wiegie voor onze dochter in Delft, de geboortestad van Van Leeuwenhoek. We besloten nog even langs mijn honderdjarige oma in Maassluis te rijden om haar de zwangere buik van mijn vrouw te laten zien en haar de naam die we voor ons kind in gedachten hadden te vertellen. Op het tafeltje naast mijn oma's stoel lag het boek *Dichter en boer*, over het leven en de gedichten van Hubert Korneliszoon Poot.

Mijn oma vertelde dat hij de beroemdste graftekst van Nederland heeft: 'Hier ligt Poot, hij is dood.' Ze vertelde ook dat haar opa van moederskant een Poot was, dat zij een directe afstammeling van dichter Poot is en ik dus ook.

Drie dagen na dat bezoek overleed mijn oma. Aan dichter Poot had ik niet meer gedacht, tot ik, zijn achter-achter-achter-

achterkleinzoon, op mijn eerste werkdag als hoofd van het enige microbenmuseum ter wereld die tekst las. Poot bleek een groot bewonderaar van Antoni van Leeuwenhoek en was gefascineerd door de microwereld die hij ontdekte. En die bewondering en fascinatie zijn meer dan driehonderd jaar na zijn dood springlevend in mij.

Eline

‘Waarom?’ Dit woord staat waarschijnlijk in mijn top tien van meest gebruikte woorden in mijn jeugd. Zodra ik kon praten begonnen de vragen en ze zijn eigenlijk nog steeds niet gestopt. Waarom is het gras groen? Waarom zijn olifanten zo groot? De vraag is niet welke vragen ik wel stelde, de vraag is of er vragen zijn die ik niet heb gesteld. Al snel kreeg ik de bijnaam ‘nieuwsgierig Aagje’.

Mijn ouders en oma, bij wie ik na school veel tijd doorbracht, hebben hun handen er vol aan gehad. Onder het motto ‘er bestaan geen domme vragen, wel domme antwoorden’ vonden ze dat iedere vraag een goed antwoord verdiende. Soms met een kleine zucht legden ze altijd alles zo goed mogelijk aan me uit. Het kan geen makkelijke opgave zijn geweest; ik wilde niet alleen het grote plaatje snappen, maar ook de details.

Mijn interesse in de wereld om mij heen bleef groeien, ik wilde nog meer weten over hoe alles werkt en waarom. Met name op het gebied van de menselijke gezondheid. Waarom word je soms ziek? Waarom ben je het grootste deel van de tijd niet ziek? Met deze vragen in mijn hoofd begon ik aan de opleiding biomedische wetenschappen. Wat ik leerde over het menselijk lichaam, hoe dit werkt en wat er fout kan gaan, sti-

muleerde mijn verwondering. Toch bleef het vak microbiologie mijn favoriet, die onzichtbare kleine wezentjes bleken extreem veel invloed te hebben op ons mensen.

Hoe verder ik kwam in mijn opleiding, hoe complexer het allemaal bleek te zijn. Bij alles wat ik leerde over de microbiologie bleek dat deze organismen, hoe ongrijpbaar ook, vaak onderdeel waren van het antwoord op mijn vragen.

Daarnaast begon het steeds meer te kriebelen, waarom weet niet iedereen hoe mooi de wereld van de microben is? Aan de dinertafel thuis, met vrienden en familie, wilde ik deze verhalen delen. Uiteindelijk kwam ik zo bij ARTIS-Micropia terecht. Hier onderhoud ik samen met mijn collega's de levende microbiële collectie. Daarnaast kan ik al die verhalen over microben ook delen met de museumbezoekers. Nog iedere dag sta ik versteld van die wonderlijke microben en hoe ze op een of andere manier bij alle processen op aarde betrokken zijn.

Deel I

Microben en de aarde

Oorspronkelijk

Ons zonnestelsel ontstond iets meer dan vierenhalf miljard jaar geleden uit een enorme wolk van gas en stof die in de ruimte zweefde. Deze wolk, die we een nevel noemen, trok onder invloed van zwaartekracht samen en terwijl dat gebeurde begon de materie rondom een middelpunt te draaien en vormde een schijf, als een soort elpee die wordt afgespeeld. In het centrum van deze schijf vormde zich een dichte kern die heet genoeg was om kernfusie te starten, waarbij grote hoeveelheden licht en warmte vrijkwamen. Dit was de geboorte van onze zon.

De rest van de materie in de astronomisch grote vinylplaat draaide door de zwaartekracht in een baan rond de zon, klonterde samen en vormde zo planeten, manen en andere hemellichamen. Ook ons eigen thuis, de aarde, ontstond toen. Door talrijke botsingen en samensmeltingen met andere objecten groeide de aarde uit tot een volwaardige planeet. Een van de belangrijkste gebeurtenissen in deze vroege geschiedenis was de botsing met de planeet Theia, die ongeveer zeven keer klei-

ner was dan de aarde. Door deze gigantische inslag viel Theia uiteen en werden grote stukken van de aarde losgeslagen. De brokstukken kwamen terecht in een baan rond de aarde en smolten vervolgens samen tot de maan.

Ook na de botsing met Theia bleef de jonge aarde een onherbergzame plek. Bombardementen van meteorieten teisterden het aardoppervlak en er was veel vulkanische activiteit. De atmosfeer bevatte nog geen zuurstof, maar een mix van gassen die voor ons giftig zou zijn. In de wolken van vulkanisch as waren donder en bliksem schering en inslag. Ergens op die onherbergzame jonge planeet ontstond het eerste leven: microben.

Hoe deze microben precies ontstonden is een mysterie en blijft voor een groot deel giswerk. Misschien waren het juist die extreme omstandigheden die de voorwaarden schiepen voor het ontstaan van leven. In 1953 voerden de Amerikaanse wetenschappers Stanley Miller en Harold Urey een baanbrekend experiment uit dat deze hypothese ondersteunde. Ze bootsten de atmosfeer van de jonge aarde na door een mengsel te maken van water, methaan, ammoniak en waterstof. Dit mengsel stelden ze bloot aan elektrische vonken, die bliksem moesten simuleren. Na slechts een week vonken op het mengsel los te hebben gelaten, ontstonden in het water allerlei organische moleculen, waaronder verschillende soorten aminozuren, die bouwblokken zijn voor eiwitten. Dit experiment toonde aan dat zulke bouwstenen van het leven spontaan kunnen ontstaan onder de omstandigheden zoals die waarschijnlijk aanwezig waren op de vroege aarde.

Zulke chemische reacties waarbij simpele stoffen worden omgezet in complexere organische moleculen hoeven niet per se met elektriciteit op gang te worden gebracht. In 1977 werden op de bodem van de diepzee hydrothermale bronnen gevonden,

en sindsdien worden deze plekken vaak gezien als een grote kanshebber als locatie voor de oorsprong van het leven.

Hydrothermale bronnen ontstaan in gebieden met veel vulkanische activiteit en zijn te vergelijken met geisers zoals we die kennen in IJsland en het Amerikaanse nationale park Yellowstone. In gebieden in de oceaan waar de aardplaten uit elkaar bewegen ontstaan er scheuren in de zeebodem waar het zeewater in kan doordringen. Dit water komt dan in de buurt van magma, waardoor het sterk opwarmt. De meeste van deze bronnen liggen op een diepte van ongeveer 3000 meter, en omdat de druk daar veel hoger is dan aan het oppervlak kookt het water niet bij honderd graden, maar kan de temperatuur oplopen tot wel vierhonderd graden. Vervolgens wordt dit hete water, dat is verzadigd met allerlei opgeloste mineralen zoals waterstofsulfide, als grote zwarte pluimen door een soort schoorsteentjes weer vanuit de zeebodem omhoog de oceaan in gespoten. Rondom deze schoorsteentjes leven hele ecosystemen van organismen die tegen extreme temperaturen bestand zijn. De microben die daar leven kunnen energie halen uit het waterstofsulfide dat door de schoorstenen wordt uitgespuwd en zijn dus niet afhankelijk van zonlicht voor hun energie. Deze bacteriën staan vervolgens weer aan de basis van een lokale voedselketen.

Er zijn verschillende redenen waarom de extreme omstandigheden rond hydrothermale bronnen geschikt zouden kunnen zijn voor het ontstaan van het leven. De grote temperatuurverschillen in het water kunnen chemische reacties aandrijven waardoor zich complexe organische moleculen kunnen vormen, net zoals elektriciteit dat in het experiment van Miller en Urey ook kon. Daarnaast scheiden hydrothermale bronnen allerlei mineralen uit die een rol kunnen spelen in die processen

en zorgen ze voor stabiele en constante energiestromen. Ook biedt de donkere diepzee bescherming tegen de schadelijke ultraviolette straling van de zon die destijds door het ontbreken van een ozonlaag ongehinderd op het aardoppervlak terechtkwam.

Er zijn nog tal van andere plaatsen geopperd als mogelijke plek waar het leven ontstaan zou kunnen zijn, bijvoorbeeld in ijskappen, in vulkanische poelen, diep in de grond of in getijdenpoeltjes langs de kust die steeds droogvallen en weer onder water lopen. Een andere fascinerende hypothese is dat het leven van buiten de aarde komt, een idee dat bekendstaat als panspermie. Deze theorie gaat ervan uit dat er leven verspreid door het universum voorkomt en dat meteorieten of kometen de aarde hebben ‘besmet’ met dit buitenaardse leven. Een intrigerende theorie, maar het verklaart niet hoe het leven in de eerste plaats is ontstaan. Het plaatst het mysterie ervan alleen maar buiten de aarde ergens in de rest van het universum.

Hoe het leven precies op aarde is ontstaan weten we dus niet. Wat we wel weten is dat er microbiel leven was en dat evolutie uiteindelijk leidde tot LUCA, de Last Universal Common Ancestor, oftewel de laatste universele gemeenschappelijke voorouder. Deze voorouder leefde naar schatting zo’n 4,2 miljard jaar geleden. LUCA vertegenwoordigt een cruciaal punt in de evolutionaire geschiedenis van het leven op aarde. Mogelijk waren er toen LUCA leefde allerlei verschillende levensvormen op aarde die totaal ongerelateerd waren aan het leven zoals we dat nu kennen, maar stierven die levensvormen na verloop van tijd allemaal uit. Dat geldt niet voor de nakomelingen van LUCA, die staat namelijk aan de basis van de gehele diversiteit aan levensvormen die we nu kennen. Van de kleinste bacteriën tot de hoogste bomen en van de uitgestorven dinosauriërs tot de

mens, allemaal stammen ze af van LUCA. Allerlei fundamentele processen die we nu in ieder organisme zien waren al aanwezig in LUCA, zoals de manier waarop DNA wordt doorgegeven aan een volgende generatie, de productie van eiwitten en het proces dat cellen hun energie geeft.

De nakomelingen van LUCA splitsten zich in twee evolutionaire lijnen: bacteriën en archaea. Deze twee groepen worden vaak over één kam geschoren, wat wordt onderstreept door het feit dat archaea ook wel oerbacteriën worden genoemd. Dat ze niet goed van elkaar onderscheiden worden is ook niet zo vreemd, ze lijken veel op elkaar. Beide zijn eencelligen zonder celkern, ze zien er onder de microscoop hetzelfde uit en vervullen soortgelijke rollen in ecosystemen. Door al die overeenkomsten duurde het tot de jaren zeventig van de vorige eeuw voordat duidelijk werd dat het om twee totaal verschillende domeinen van het leven gaat. Want grote verschillen zijn er wel degelijk, en die zogenaamde ‘oerbacterie’ staat evolutionair gezien dichterbij de mens dan bij de huidige bacteriën.

De verschillen tussen bacteriën en archaea zitten voornamelijk in de basale structuren waarmee hun cellen zijn opgebouwd. Een voorbeeld hiervan zijn de celwanden, de buitenste laag tussen de cel en de buitenwereld die zorgt voor stevigheid. In de celwand van bacteriën zorgt de stof *mureïne* voor de stevigheid, terwijl archaea verschillende andere stoffen hebben. Door dit fundamentele verschil hebben de celwanden andere eigenschappen, waardoor de twee groepen zijn aangepast aan verschillende omstandigheden, wat gevolgen heeft voor de plekken waar ze te vinden zijn.

Bacteriën komen vrijwel overal voor en ze domineren vaak gematigde omstandigheden te land, ter zee en in de lucht. Veel bacteriën leven in of op planten en dieren en spelen cruciale

rollen in de recycling van voedingsstoffen of de afbraak van organisch materiaal, of het zijn pathogenen die ziekten kunnen veroorzaken. Sommige bacteriën kunnen ook in extreme omstandigheden leven, maar het zijn vooral de archaea die daarin excelleren.

Microben die goed gedijen in extreme omstandigheden noemen we extremofielen. Er zijn allerlei soorten van, bijvoorbeeld microben die leven bij hoge temperaturen (thermofielen), bij lage temperaturen (psychrofielen), onder hoge druk (barofielen), in een sterk verzuurde omgeving (acidofielen) of bij een hoog zoutgehalte (halofielen). Soms zijn ze aan meerdere extremen tegelijk aangepast, dan noemen we ze polyextremofiel. Een voorbeeld hiervan zijn de microben die op grote diepte bij hoge druk en bij extreem hete hydrothermale bronnen leven. Door hun celopbouw zijn archaea over het algemeen veel beter aangepast aan zulke extreme omstandigheden en komen ze niet zo algemeen voor als bacteriën; je vindt ze voornamelijk in bijvoorbeeld hete bronnen, zoute meren of zuurstofarme moerassen. Dat wil niet zeggen dat wij niets met ze te maken hebben, want verschillende archaea kunnen onderdeel uitmaken van ons microbioom, zoals *Methanobrevibacter smithii* die veel voorkomt in de menselijke dikke darm.

Naast bacteriën en archaea is er nog een derde domein van organismen, de eukaryoten, de groep waartoe alle schimmels, planten en dieren behoren. Ze ontstonden ongeveer anderhalf tot twee miljard jaar geleden, halverwege de geschiedenis van onze aarde en ruim nadat de eerste microben op aarde verschenen. Eukaryoten worden gekenmerkt door complexere cellen die netjes georganiseerd zijn. Net zoals een menselijk lichaam netjes is georganiseerd met organen, zijn eukaryote cellen georganiseerd met organellen. De woorden organisatie, organen en

organellen hebben ook allemaal dezelfde oorsprong, namelijk in het Griekse woord *organon*, wat ‘instrument’ of ‘gereedschap’ betekent.

De organellen in eukaryote cellen hebben allemaal een eigen rol in de cel. Een voorbeeld is de celkern waarin al het genetische materiaal van de eukaryote cel opgeborgen zit, terwijl alles bij bacteriën en archaea los in de cel drijft. Eukaryoten ontstonden waarschijnlijk uit een symbiotische relatie tussen archaea en bacteriën. De meest geaccepteerde theorie is dat een archaea als gastheer een bacterie opnam en dat beide cellen samen gingen werken, de bacterie binnen in de archaea. Na verloop van tijd verloren beide cellen allerlei functies, waardoor de bacterie zich voornamelijk nog bezighield met het opslaan, kopiëren en doorgeven van het DNA en zo een organel werd, een instrument in een cel en geen onafhankelijk levend organisme meer.

Dat eukaryoten complexere cellen hebben, betekent niet direct dat ze geen microben meer zijn. Eukaryoten hebben zich als enige ontwikkeld tot meercellige organismen, maar er zijn ook allerlei soorten eukaryoten die net als bacteriën en archaea uit een enkele cel bestaan en alleen met een microscoop kunnen worden waargenomen, zoals eencellige algen en eencellige schimmels, waaronder gisten. Daarnaast zijn er allerlei andere meercellige organismen die tot de microben worden gerekend, zoals beerdiertjes en schimmels die schimmeldraden vormen.

Tegenwoordig is er veel discussie over de afnemende biodiversiteit en de eventuele maatregelen die moeten worden genomen om deze te beschermen. Als het gaat om biodiversiteit dan denken we vaak aan de natuur in al haar glorie. We willen de reuzenpanda's (*Ailuropoda melanoleuca*) in de Chinese bamboebossen beschermen, de kap van tropische regenwou-

den tegenhouden, olieboringen in natuurgebieden stoppen en een Nederland vol met weidevogels in stand houden. Het is logisch dat dieren en planten het narratief domineren, dit zijn namelijk de soorten die we kunnen zien en waarvan we de afwezigheid kunnen waarnemen. Maar het is belangrijk om ons te realiseren dat we hiermee maar een klein hoekje van het hele spectrum aan soortendiversiteit dekken. De echte kampioenen van diversiteit zijn de microben en ze vormen naar schatting meer dan 90 procent van alle soorten op aarde. Naast hun ongeëvenaarde diversiteit komen ze ook heel veel voor, want ondanks hun kleine formaat is hun gezamenlijke gewicht enorm. Er wordt geschat dat microben ongeveer 15 procent van de totale biomassa op aarde uitmaken, bijna veertig keer meer dan alle dieren samen.

Nog even terug naar LUCA. Deze oermicrobe staat dus aan de basis van de stamboom van al het leven op aarde, en LUCA's afstammelingen leven nu op elk denkbaar stukje van de planeet. Vanuit deze ene oorsprong zijn de uiteenlopendste levensvormen ontstaan. Ook de herkomst van de mens is uiteindelijk terug te leiden tot LUCA. Het is een fascinerende gedachte dat onze uitgebreide lichamen met complexe hersenen verbonden zijn met die eerste simpele microbe die miljarden jaren geleden waarschijnlijk bij een hydrothermale bron in de oceaan leefde. De evolutionaire reis die vanaf LUCA leidde naar onszelf en al die andere soorten organismen is bijna ongelooflijk. Maar die evolutionaire reis is dan ook gigantisch lang. Om een idee te krijgen van de grote hoeveelheid generaties die er tussen ons en LUCA liggen, kunnen we een heel ruwe berekening maken. Dit is een ingewikkelde berekening, omdat sommige microben zich in optimale omstandigheden binnen twintig minuten kunnen voortplanten, terwijl vroege mensen een gemiddelde generatie-

tijd hadden van zo'n zevenentwintig jaar. Het overgrote deel van de tijd tussen LUCA en nu bestond al het leven uit microben, dus laten we een gemiddelde generatietijd van een dag nemen. In dat geval zouden er sinds LUCA meer dan een biljoen generaties zijn geweest, in cijfers is dat 1.000.000.000.000. Deze schatting is extreem onbetrouwbaar, maar laat wel goed zien hoeveel tijd er is verstreken tussen die eerste microben en de grote verscheidenheid aan leven op aarde zoals we die vandaag de dag kennen.

De aarde is een planeet vol leven. Het leven is ontstaan bij microben, en ze zullen er nog zijn als de mens weer verdwenen is. Wij zijn slechts passanten in deze microbiële wereld. Om een uitspraak van de Amerikaanse bioloog Craig Venter vrij te vertalen: 'Als je niet van microben houdt, ben je op de verkeerde planeet.'