

De noodzaak van brede maatschappelijke kennis over de microbiologie

Nederlandse versie door Mike Jetten en Marien de Jonge
Radboud Universiteit en Radboudumc, Nijmegen,

Microben en hun activiteiten hebben een allesomvattende, opmerkelijk diepgaande en veelal positieve effecten op het functioneren, en dus op de gezondheid en het welzijn, van de mens, de hele biologische wereld, en zelfs het volledige aardoppervlak en de atmosfeer. Microben vormen collectief het levensondersteunende systeem van de biosfeer, in belangrijke mate in samenwerking met de zon. Daarom verdienen ze de nodige aandacht. Niet alleen bij beslissingen van individuen en gezinnen in het dagelijks leven, maar ook bij beslissingen van individuen en verantwoordelijke instanties op alle niveaus en in alle stadia van de evaluatie en planning van het gezond en goed functioneren van gemeenschappen, landen en de hele wereld, en bij de formulering van relevant beleid. Over andere onderwerpen die een allesomvattende invloed hebben op de mensheid, zoals financiële zaken, gezondheid en transport, is er een brede kennis in de maatschappij. Dat is totaal anders voor wat betreft de kennis over de activiteiten van relevante microben; hoe ze ons leven beïnvloeden en hoe ze kunnen worden ingezet in het voordeel van de mensheid, dus *kennis over microbiologie*, bij de algemene bevolking en bij de besluitvormers die daar deel van uitmaken. Keuzes die te maken hebben met de implicaties van microbiële activiteit zijn vaak ondoorzichtig. De beschikbare informatie is soms vooringenomen en meestal onvolledig, en dat leidt tot aanzienlijke onzekerheid. Als gevolg hiervan kunnen zelfs wetenschappelijk onderbouwde ‘beste’ beslissingen leiden tot onvoorspelbare, onbedoelde en soms ongewenste resultaten. Dit komt vaker voor dan we denken. Wij stellen daarom dat *kennis over microbiologie* in de samenleving onmisbaar is voor weloverwogen persoonlijke beslissingen, maar ook voor beleidsontwikkeling bij de overheid en het bedrijfsleven, en voor input van maatschappelijke belanghebbenden met kennis van zaken bij zulke beleidsvorming. Een goed begrip van de belangrijkste microbiële activiteiten is net zo essentieel voor het volwassen worden als bepaalde vakken die momenteel op school worden onderwezen. Daarom moeten kinderen dit leren als onderdeel van het algemene onderwijs. *Kennis over microbiologie moet een onderdeel worden van de taakomschrijving van de wereldburger. Microbiologie moet een plaats krijgen in lesprogramma's om de kennis erover in de samenleving te vergroten.* Ter ondersteuning daarvan stellen we hier een basaal onderwijsconcept en -formaat voor dat geschikt is voor kinderen van alle leeftijden, van peuters tot en met middelbare scholieren. Hiermee worden verbanden gelegd tussen essentiële microbiële activiteiten en de invloed daarvan op ons dagelijkse leven, de relevante grote wereldproblemen voor de mensheid en de aarde, en duurzaamheid en de Duurzame Ontwikkelingsdoelen. We doen een beroep op microbiologen, microbiologische genootschappen en professionals met kennis over microbiologie om deel te nemen en bij te dragen aan dit initiatief. Zij kunnen meehelpen bij de ontwikkeling van het basisconcept, het ontwikkelen en zoeken naar financiering voor nieuwe kindvriendelijke, aantrekkelijke leermiddelen en leermaterialen, het vergroten van de impact, en – het allerbelangrijkste – het overtuigen van onderwijzers, beleidsmakers, bedrijfsleiders en relevante overheids- en particuliere instanties om dit initiatief te ondersteunen en te promoten. *Kennis over microbiologie moet realiteit worden in onze samenleving.*

De context

Microbiomen en biomen. Alle *macro*-organismen in de biosfeer – dieren en planten – hebben op vrijwel alle lichaamsoppervlakken die in contact staan met de omgeving gemeenschappen van *micro*-organismen, die als het ware een tweede huid vormen. Deze microbiële ‘huid’ vormt een extra, dynamische, ecofysiologische barrière waardoor de fysische en chemische barrièrefuncties (bijvoorbeeld tegen een aanval van ziekteverwekkers) van het huidoppervlak worden versterkt. Zulke microbiële gemeenschappen doen echter niet alleen dienst als barrière. Ze hebben ook veelzijdige interacties met hun waard, ze vervullen onmisbare functies en hebben een allesomvattende invloed op het welzijn en de biologische kenmerken van het *macro*-organisme waarmee ze samenleven. Microben helpen planten bijvoorbeeld bij het verkrijgen van essentiële mineralen en stikstof voor de groei¹, ze beschermen hun waardplant tegen infecties en produceren hormoonachtige stoffen die de plantengroei bevorderen. Sommige microben die op planten leven, zijn giftig voor dieren en fungeren daarom als afweer tegen vraat. *Micro*-organismen beschermen dieren tegen ziekten, fermenteren voedsel in het spijsverteringsstelsel van herkauwers zoals koeien en verteren voedsel voor insecten. In feite alle *macro*-organismen zijn bedekt met microbiële gemeenschappen, en daarnaast hebben sommige ook zogeheten endosymbiotische *micro*-organismen die *in* de cellen van de waard leven. Endosymbionten spelen een belangrijke rol in de levenscyclus van verschillende organismen, zoals insecten (waar ze zelfs het geslacht van de gastheer kunnen bepalen), sponzen, planten en enkele andere *micro*-organismen, zoals protozoa. Celorganellen zijn geëvolueerd uit endosymbiotische bacteriën. Daarbij gaat het om plastiden, die zonne-energie vastleggen in fotosynthetiserende organismen, en om mitochondriën, die voor de energieopwekking zorgen in de meeste organismen. De microbiële component van een organisme, het zogeheten *microbioom*², is een essentieel kenmerk van de identiteit en de ecofysiologie van een organisme: dieren en planten zonder microben zijn gedrochten uit het laboratorium met een gebrekkige ontwikkeling, waardoor ze ongeschikt zijn om te overleven in hun natuurlijke habitat. Het geïntegreerde geheel, bestaande uit *microbioom* en waard, wordt het *bioom* genoemd. Een verstoring van het *microbioom*, die tot zogeheten *dysbiose* leidt, kan de relatie met de waard en de functies die bijdragen aan het welzijn negatief beïnvloeden. Een voorbeeld hiervan is de door het onkruidbestrijdingsmiddel glyfosaat veroorzaakte verstoring van de microbiële gemeenschap in het darmkanaal van bijen, waardoor de bijen gevoeliger worden voor ziekteverwekkers (Motta et al, 2018).

Mensen bestaan voor 50 procent uit micro-organismen. Het menselijke *bioom* bestaat wat betreft het aantal cellen voor 50 procent uit *micro*-organismen (Sender et al., 2016). Microben in onze darmen verteren een groot deel van ons voedsel en geven de voedingsstoffen vrij in vormen die wij kunnen opnemen en gebruiken. Ze leveren essentiële vitamines, aminozuren en andere micronutriënten die we zelf niet kunnen maken, ze produceren hormoonachtige stoffen waardoor ze als een tweede endocrien systeem fungeren (Brown en Hazen, 2015), en ze spelen een rol bij een reeks van fysieke en psychische ziekten, waarover momenteel steeds meer duidelijk wordt (Wang, et al, 2017; Du Toit, 2019). Een klassiek

¹ Als *micro*-organismen geen stikstof zouden vastleggen, was er onvoldoende biomassaproductie door primaire plantaardige producenten geweest en hadden dierlijke consumenten zich niet kunnen voortplanten en niet kunnen evolueren.

²Microbioom: ‘een kenmerkende microbiële gemeenschap die een redelijk goed omschreven biotoop met verschillende fysisch-chemische eigenschappen bezet. De term verwijst dus niet alleen naar de betrokken *micro*-organismen, maar omvat ook de plaats waar ze actief zijn.’ (Whipps et al., 1988).

voorbeeld van een *dysbiose* van het menselijk microbioom is een door antibiotica geïnduceerde verstoring van de microbiële gemeenschap in de darmen, waardoor *Clostridium difficile* de overhand krijgt en pseudomembraneuze colitis veroorzaakt (Bartlett, 1979). We moeten absoluut erkennen dat we vanaf onze geboorte tot aan onze dood in een intieme, dynamische en wederzijds voordelige relatie met onze microbiële bondgenoten leven. Dit is een geïntegreerde, wederkerige relatie die in belangrijke mate bepaalt wat en hoe – en dus wie – wij zijn (en natuurlijk wie zij zijn). Om Descartes te actualiseren: *Ik denk, daarom bestaan we.*

We kunnen blijven piekeren over hoe weinig we weten over de mensen om ons heen en hoe weinig we hen kunnen vertrouwen, terwijl we in essentie niets weten over onze meest intieme en invloedrijke bondgenoten. Willen we leren hoe we ons persoonlijk welzijn zo groot mogelijk kunnen maken? Dan zullen we moeten begrijpen

- *wat onze microbiële bondgenoten doen,*
- *welke impact hun activiteiten op ons hebben,*
- *hoe onze microbiële bondgenoten en hun activiteiten worden beïnvloed door wat wij doen, en*
- *hoe we onze samenwerking kunnen verbeteren in het belang van beide partijen.*

Microben in dienst van de mensheid. Microben hebben niet alleen invloed op ons persoonlijk, ze worden ook sinds mensenheugenis ingezet ten dienste van de mensheid. Aanvankelijk gebeurde dat bij de productie van gefermenteerd voedsel en dranken (bier, wijn, gefermenteerde zuivelproducten), gedeseemd brood, touw (het roten van vlas), het behoud van de bodemvruchtbaarheid (verbouwen van peulvruchten met stikstofbindende bacteriën, bemesting met microbiële biomassa). Tegenwoordig worden microben ook ingezet bij de vermindering van vervuiling door afbraak van huishoudelijk en industrieel afval, en om schoon drinkwater te leveren. Toepassing van microben heeft in belangrijke mate bijgedragen aan de opkomst van de beschaving en aan een beter en langer leven voor mensen. Dat is met name gebeurd door de fermentatie van voedsel om het te conserveren en de voedingswaarde ervan te verbeteren, en door latere hygiënische verbeteringen door microbiële behandeling van menselijk afval waardoor hier minder ziekten werden overgedragen.

In recenter tijden zijn microben in het centrum van de ontluikende bio-economie komen te staan (zie bijv. Timmis et al, 2017). Tegelijkertijd is er een grote verschuiving gaande in het wereldwijde economische kader, de vierde Industriële Revolutie (4IR). De 4IR levert een onbeperkte verbondenheid, kunstmatige intelligentie, massale detectie, verwerking van big data, robotica en vele andere functies. Maar daarnaast voorziet ze in de duurzame productie van goederen in de context van een kringlooeconomie zonder afval of schadelijke uitstoot, waarin alles wordt gerecycled (zie bijv. Nielsen, 2017). Microbiële processen zijn bij uitstek geschikt voor de 4IR omdat er geen extreme omstandigheden, hoge energie-input en giftige reagentia voor nodig zijn. Nieuwe materialen, afval dat ontstaat bij de productie daarvan en de uitgangsstoffen die daarbij betrokken zijn, kunnen over het algemeen eenvoudig gerecycled worden. Voorheen vormde chemische omzetting door microbiële biokatalyse slechts een enigszins marginale aanvulling op chemische processen, gericht op de productie van een klein aantal bioactieve moleculen met een hoge toegevoegde waarde. Maar inmiddels worden microbiële reacties ingezet als reëel en ecologisch duurzaam alternatief voor grootschalige chemische omzetting van hernieuwbare grondstoffen in producten. Aan de basis van deze ontwikkelingen staan celfabrieken (meestal microbieel) en de daaruit verkregen enzymen, natuurlijk of opnieuw geprogrammeerd.

Naast biokatalyse zijn er talloze voorbeelden te noemen van manieren waarop micro-organismen tegenwoordig worden toegepast. Daarbij valt te denken aan:

- de productie van diverse voedingsmiddelen (yoghurt, kaas, natto, eencellige eiwitten, chocolade, gerijpte worst, augurken, probiotica), voedingsaroma's (vanille, sojasaus, kimchi, padeak, soumbala) en voedingssupplementen (vitamines, aminozuren, folaat, probiotica),
- de productie van geneesmiddelen (antibiotica, hormonen, biologische geneesmiddelen), vaccins, diagnostische en biosensormonitoringsystemen, en persoonlijke verzorgingsproducten,
- het beschermen en bevorderen van de groei van landbouwgewassen,
- fermentatiereacties voor de productie van diverse chemicaliën en biomaterialen (bioplastics, microbiële cellulose),
- groene chemische engineering, zoals elektrolyse, en het gebruik van het broeikasgas koolstofdioxide als materiaal voor chemische synthese,
- energieproductie (biogas, microbiële brandstofcellen),
- terugwinning van natuurlijke hulpbronnen zoals aardolie (door microbiel verbeterde olieterugwinning), metalen (door industriële bio-uitloging als vervanging van zwaar vervuilende thermische processen),
- behandeling van afvalstromen en bioremediatie van vervuilde locaties,
- biologische reiniging, restauratie en bescherming van historisch cultureel erfgoed (monumenten, standbeelden, fresco's, schilderijen, documenten).

Daarnaast is er een breed scala aan nieuwe toepassingen in ontwikkeling, waaronder microbiële behandelingen voor ziekten veroorzaakt door *dysbiose* van het microbioom (pseudomembraneuze colitis, infectieuze darmziekte, obesitas, diabetes en verschillende psychologische aandoeningen; zie bijv. Rossen et al., 2015), synthetisch-biologische herprogrammering van biotechnologisch relevante cellen en organismen om een hoge productie/activiteit te bewerkstelligen, biotechnologie op ecosysteemniveau, enz. De verbazingwekkende metabole veelzijdigheid van microben levert voortdurend nieuwe mogelijkheden op voor de duurzame productie van bulk- en speciale chemicaliën en materialen (Lee et al., 2019).

Een op kennis gebaseerde, biocentrische economie moeten nieuwe mogelijkheden van microbiële activiteiten tijdig herkennen, voordelen en mogelijke risico's nauwkeurig beoordelen, en wetenschappelijk onderbouwde besluiten nemen over activiteiten die nodig zijn om de exploitatie ervan te vereenvoudigen. Dat is van essentieel belang om concurrerend te zijn en om aanzienlijke vooruitgang te boeken in de richting van duurzaamheid in de praktijk. Daarvoor is het absoluut noodzakelijker dat er voldoende kennis is over de onderliggende microbiologie op alle niveaus in de beslissingsketen, ook bij het grote publiek als belangrijkste belanghebbende.

Beleidsbeslissingen die gebaseerd zijn op de kennis over onderliggende microbiologische processen vormen de basis voor toekomstige ontwikkeling, welzijn, verwezenlijking van duurzaamheid en de vooruitgang van de beschaving. De snelheid en richting van de toekomstige ontwikkeling hangt sterk af van de mate waarin

we ons inzetten om

- microbiologische processen onbevangen te onderzoeken en daardoor voortdurend beter te worden in het voorspellen en identificeren van mogelijke nieuwe commerciële toepassingen op basis van micro-organismen³,
- adequaat gebruik te maken van nieuwe toepassingen voor de verbetering van de gezondheid van mens en aarde,
- moderne toepassingen uit te breiden en te verbeteren, en
- geschikte, wetenschappelijk onderbouwde besluitvormings- en brontoewijzingssystemen te ontwerpen om relevante onderzoeks-, ontwikkelings- en commercialiseringsactiviteiten te stimuleren en mogelijk te maken, en relevante voorkeuren van belanghebbenden op de juiste manier op te nemen.

Microben hebben een allesomvattende en diepgaande invloed op de mens, individueel en collectief. Microben kunnen op enorm veel manieren invloed uitoefenen op ons leven en zijn dus relevant voor talrijke individuele beslissingen. Daarbij valt bijvoorbeeld te denken aan de beslissing of we moeten bevallen via een keizersnede (aseptisch) of via de natuurlijke weg (kolonisatie van de pasgeborene door microben van de moeder; [Wampach et al., 2018]), borstvoeding moeten geven (de baby beschermende antilichamen leveren tegen ziekteverwekkers, menselijke melkoligosacchariden die bifidobacteriën bevoordelen, een groep bacteriën waarvan aangenomen wordt dat ze aan de basis staan van een gezonde ontwikkeling van het immuunsysteem [Gomez de Agüero, 2016; Moossavi et al, 2018], microben van de moeder in de moedermelk enz. [Milani et al, 2017]), vaak schoonmaken met krachtige ontsmettingsmiddelen in huis (vermindering van de blootstelling van zuigelingen aan een divers microbioom en de gezondheidsvoordelen daarvan: Finlay en Arrieta, 2016; Gilbert en Yee, 2016; Bach, 2018; Sharma en Gilbert, 2018; en in ziekenhuizen: zie Caselli, 2017), gevaccineerd of behandeld worden voor een infectie (Lane et al, 2018), fosforbevattende huishoudelijke schoonmaakproducten gebruiken (Richards et al, 2015; zulke producten kunnen bijdragen aan eutrofiëring en schadelijke algenbloei in lokaal oppervlaktewater), antimicrobiële zeep gebruiken (kan het huidmicrobioom verstoren; Gilbert en Yee, 2016), een hond nemen als huisdier (vereenvoudigt de uitwisseling van microbioomsoorten, Trinh et al, 2018; verhoogt de fosfortoevoer in het waterstroomgebied; Hobbie et al., 2017), of de keuze van het voedsel dat we eten (bijv. rundvlees, dat een aanzienlijke methaanvoetafdruk heeft; rundvlees en zuivelproducten, waarvan de consumptie gecorreleerd is met diverse kankersoorten, zur Hausen et al, 2017; ander vlees en groenten: herkomst, houdbaarheid, associaties met bekende risicofactoren enz.) en hoe we voedsel bewaren en bereiden, in welke mate we onze huis ventileren/bevochtigen/ontvochtigen enz.

³ Nieuwe ontdekkingen zijn het resultaat van onderzoek. Onderzoek is echter georganiseerd in vakgebieden en groepen van verwante vakgebieden, wat tot op zekere hoogte een belemmering oplevert voor vakgebied overstijgende ontdekkingen. Het is belangrijk op te merken dat veel van de benodigde veranderingen voor de bescherming van het milieu, de volksgezondheid en de voedselzekerheid een vakgebied overstijgende onderzoeksplanning en -implementatie vereisen. Omdat de microbiologie zoveel verschillende takken en toepassingen heeft en de effecten ervan op het leven en de aarde alomtegenwoordig zijn, zouden onderzoekers vanzelf beter buiten hun eigen vakgebied kunnen kijken als ze kennis over microbiologie opdoen. Hierdoor zouden er ongetwijfeld sneller innovatieve oplossingen en beheeropties komen voor veel van de ernstige milieu- en gezondheidsproblemen waarmee we momenteel te kampen hebben.

Laten we dat illustreren aan de hand van een specifieke activiteit waar mensen veel plezier aan beleven, namelijk op vakantie gaan. Hierdoor kunnen we worden blootgesteld aan allerlei infecties en microbiële ziektes, waarvan sommige levensbedreigend, die in onze vertrouwde omgeving minder voorkomen of afwezig zijn. Dat kan bijvoorbeeld via

- *zwemmen en baden* in zoet- en zeewater (bijv. *Cryptosporidium*, *Vibrio vulnificus*, *Leptospira* e.d.), en in onvoldoende gechloreerde zwembaden en met name bubbelbaden (*Mycobacterium*, *Pseudomonas*, *Legionella*, *Candida*, *Trichophyton*, *Giardia* e.d.),
- *eten* van rauw of besmet voedsel, vooral zeevruchten (bijv. *Salmonella*, *Vibrio*, EHEC, *Campylobacter*, *Listeria*, *Norovirus*, hepatitisvirussen en diverse parasieten), en zelfs voldoende gekookt voedsel dat hittestabiele toxines bevat (waaronder het dodelijke neurotoxine mosselgif en verschillende mycotoxinen),
- *drinken* van besmette vloeistoffen (bijv. water, vruchtensap e.d.),
- *seksuele activiteit*, met nieuwe partners (klassieke soa's, maar ook hiv e.d.),
- *keuze van vakantiebestemming*, waar infectieziekten zoals gele koorts, malaria, zikavirus, hepatitisvirus, denguevirus, de ziekte van Lyme en tuberculose endemisch kunnen zijn, en
- *de keuze van accommodatie en wellnessfaciliteiten*, zoals cruiseschepen (bijv. *Cyclospora*, *Norovirus*, *Legionella* en mycobacteria).

Uiteraard kunnen we ook op zakenreis blootstaan aan soortgelijke gevaren, en medisch toerisme kan extra gevaren met zich mee brengen, samenhangend met operaties en ziekenhuizen.

Microbiële activiteiten hebben ook invloed op collectieve activiteiten, en bij veel strategische en beleidsbeslissingen is het essentieel dat hier rekening mee wordt gehouden. Daarbij kan het gaan om de introductie van een nieuwe grondstof en daarmee het creëren van een nieuw soort afval in een industriële productiefaciliteit, de introductie van een nieuw ingrediënt in een voedingsproduct, het opzetten van een nieuwe voedselvoorzieningsketen, de invoering van een nieuwe volksgezondheidsmaatregel, de implementatie van nieuwe landbouwwerkwijzen of de invoering van nieuwe maatregelen om zeeën en oceanen te beschermen tegen achteruitgang.

Als we effectieve persoonlijke en beleidsbeslissingen willen nemen met een grote kans op voorspelbare en beoogde resultaten, moeten we weten welke microbiële activiteiten relevant zijn en hoe deze activiteiten van invloed kunnen zijn op, en worden beïnvloed door, de implementatie van deze beslissingen. Voor het nemen van routinebeslissingen in ons leven moeten we een basiskennis hebben (en toepassen) over

- *de nadelige gevolgen die onze acties kunnen hebben, en*
- *hoe we ons gedrag kunnen aanpassen om zulke gevolgen voor ons en anderen te voorkomen of te verminderen.*

Microben hebben een allesomvattende en diepgaande invloed op de hele biosfeer.

Microben zijn bijna 4 miljard jaar geleden ontstaan als de eerste vorm van leven. En ze zijn ook de toekomst van het leven: lang nadat de mens en andere levensvormen zijn verdwenen, blijven zij de aarde bewonen. De onzichtbare wereld van de microben vertegenwoordigt een veel grotere evolutionaire en metabole diversiteit dan de zichtbare organismen die we zo goed kennen. Wat biomassa betreft, bestaat 90 procent van het leven in de oceanen uit microben. Fotosynthetische algen en cyanobacteriën vormen een belangrijk onderdeel van zeeplankton en vormen de basis van voedselnetwerken in de oceaan. *Prochlorococcus* en *Synechococcus* halen per

jaar ongeveer 10 miljard ton koolstofdioxide uit de lucht, wat goed is voor ongeveer twee derde van de totale koolstofvastlegging in de oceanen. Microben reguleren globale en lokale biogeochemische processen met een fundamentele invloed op de uitstoot van broeikasgassen in de atmosfeer en de klimaatverandering. Verder reguleren ze de gezondheid van mensen, dieren, planten, de bodem en de watervoorziening. Ze produceren 50 procent van de zuurstof die we inademen. Vroege microben produceerden de zuurstof waardoor alle organismen die zuurstof gebruiken konden evolueren, evenals de ozonlaag waardoor het leven aan land kon komen vanuit de diepe oceanen. Ze zijn de grootste afvalverwerkers en -opwerkers van de planeet. Microben zijn overal aanwezig en hun activiteiten ondersteunen en beïnvloeden de kwaliteit van alle leven op aarde. *Ze vormen het levensondersteunende systeem van de biosfeer.* Wij mensen beschouwen onszelf weliswaar als beheerders van de aarde en als verantwoordelijken voor de gezondheid ervan, maar microben beïnvloeden, regelen en veranderen de activiteiten op aarde veel sterker. Om het extreem te stellen: stel dat een grote groep microben die een kritisch proces in de cyclus van voedingsstoffen uitvoert verloren ging in de biosfeer en niet kon worden vervangen door een groep die dezelfde functie kon uitvoeren. Dat zou het einde betekenen van het leven op aarde zoals wij dat kennen⁴. Het microbioom van het wereldwijde milieu is, wat betreft activiteiten en dimensie, de enige bondgenoot waarop we kunnen rekenen om de impact van vervuilende emissies als gevolg van industriële activiteiten, intensieve landbouw en overbevolking om te keren (de Lorenzo et al, 2016)

We moeten collectief de onmisbare rol herkennen die microben spelen in wereldwijde processen en de gezondheid van de aarde, en kennis verwerven over wat microben doen en kunnen doen. Dat hebben we nodig om effectieve samenwerkingen en strategieën te kunnen ontwikkelen voor een gezamenlijk beheer van de gezondheid van de aarde. Het is absoluut noodzakelijk dat we

- *het delicate evenwicht tussen door microben geregelde nutriëntencycli, het functioneren van de aarde en de gezondheid van de biosfeer begrijpen en waarderen, en*
- *zorgen dat we geen negatief effect uitoefenen (zelfs onopzettelijk) op de microbiële groepen/gemeenschappen die een onmisbare rol spelen voor het functioneren van de biosfeer.*

⁴ Dit idee lijkt op het eerste gezicht misschien nogal vergezocht (vooral in combinatie met de andere verklaring hieronder dat *alle microben overal zijn*). Maar het is de moeite waard om hierover na te denken: door veranderingen in milieuomstandigheden, bijv. door het broeikaseffect, kunnen habitats ongunstig worden voor de organismen die er leven. Het gevolg is dat die organismen ofwel (1) moeten verhuizen naar gunstiger habitats, (2) zich moeten aanpassen of nieuwe eigenschappen ontwikkelen die beter zijn afgestemd op de nieuwe omstandigheden, of (3) sterven en, als ze geografisch beperkt zijn, misschien uitsterven. Organismen die zich snel voortplanten, evolueren het makkelijkst. Maar in een aantal biotopen van de biosfeer planten microben zich extreem langzaam voort. Bij snelle veranderingen zouden ze kunnen uitsterven. Als er soorten uitsterven die behoren tot een groep met een onmisbare rol in de biosfeer, kunnen er ernstige gevolgen optreden. Curtis (2006) heeft dit vrij scherp geformuleerd: *"...het zou rampzalig zijn als de laatste blauwe vinvis stikt in de laatste panda, maar dat betekent niet het einde van de wereld. Maar als we per ongeluk de laatste twee soorten ammoniumoxiderende micro-organismen vergiftigen, is dat heel iets anders. Misschien gebeurt dat precies op dit moment, en we zouden niet eens weten..."*

We kunnen niet zonder de inzet van microbiële activiteiten om bepaalde grote wereldproblemen op te lossen en de Duurzame Ontwikkelingsdoelen te behalen. De mensheid staat momenteel voor grote problemen, onder andere een onevenwichtige toegang tot voedsel, schoon water, gezondheidszorg, onderwijs, energie en grondstoffen, aanhoudende armoede, verlies van bewoonbaar land als gevolg van de stijgende zeespiegel door de opwarming van de aarde, en woestijnvorming, om maar een paar van de grote wereldproblemen te noemen. In de Duurzame Ontwikkelingsdoelen (Sustainable Development Goals, SDG's) van de VN is uitgewerkt wat de mensheid en de aarde nodig hebben, samen met een actieplan om op duurzame wijze aan deze behoeften te voldoen (Verenigde Naties, 2015). In een recent nummer van Microbial Biotechnology (2017) worden microbiële technologieën verkend met een (potentiële) bijdrage aan het bereiken van SDG's en het verminderen van wereldproblemen. Daarbij gaat het om problemen op het gebied van de voedselvoorziening voor de voortdurend groeiende wereldbevolking (Trivedi et al, 2017; Garcia et al, 2017), de productie van broeikasgassen, de opwarming van de aarde en enkele van de negatieve gevolgen daarvan, en wereldwijde vervuiling. Verder komt aan bod hoe met zulke technologieën zoveel mogelijk gebruikgemaakt kan worden van hernieuwbare energiebronnen en de duurzaamheid van het verbruik van natuurlijke hulpbronnen in de wereld zo groot mogelijk gemaakt kan worden, e.d. (bijv. Verstraete en De Vrieze, 2017; de Lorenzo, 2017). Deze kwestie heeft ook betrekking op het uitzonderlijke potentieel van microbiële biotechnologie voor een andere SDG, namelijk *het creëren van duurzame economische groei en werkgelegenheid*, in verband met nieuwe bedrijven, werkgelegenheid en welvaart, gedeeltelijk in de context van de bio-economie (Timmis et al., 2017), maar ook in andere contexten. In een aantal artikelen in hetzelfde tijdschrift in 2017 en 2018, gepubliceerd onder de overkoepelende titel *The microbiome as a source of new enterprises and job creation* (Het microbioom als bron van nieuwe bedrijven en het scheppen van banen) werd het vermogen van microbioomtechnologie onderzocht om nieuwe bedrijvigheid en werkgelegenheid te genereren.

Bij veel van de acties die moeten worden genomen op de lange weg naar het aanpakken van grote wereldproblemen en het bereiken van de SDG's spelen microbiële processen een rol. Voor de belangrijkste beleidsbeslissingen die nodig zijn om deze acties in werking te zetten/te behouden/de bijdrage ervan te verhogen, is kennis nodig over relevante microbiële activiteiten en hoe deze in banen kunnen worden geleid voor een zo groot mogelijk gunstig effect.

Beslissingen die op basis van kennis over onderliggende microbiologische processen worden genomen, kunnen grote en in sommige gevallen wereldwijde rampen voorkomen. Microben spelen een centrale rol en hebben direct belang bij de evolutie van de aarde en de organismen die er leven. Als er geen erkenning, kennis en aandacht is voor de manier waarop micro-organismen bijdragen aan relevante processen, en als in een planning geen rekening gehouden wordt met de rol die microben kunnen spelen bij een voorgenomen verandering, leidt dat op alle niveaus (internationaal, nationaal, regionaal en individueel) tot beleid dat uitermate riskant, niet optimaal of ineffectief is, en in het slechtste geval contraproductief. Voorbeelden van mogelijk te voorkomen rampen die negatief worden beïnvloed/veroorzaakt door beleidsbeslissingen of het gebrek daaraan zijn:

De crisis van de antibioticaresistentie. Al in de jaren 60/begin jaren 70 van de vorige eeuw waarschuwden vooraanstaande microbiologen zoals Falkow (Falkow et al., 1961; Falkow 1970, 1975), Watanabe (Watanabe, 1963; 1966) en Levy (Levy et al, 1976; Levy, 1982) voor de

groeierende opkomst en verspreiding van antibioticaresistentie als gevolg van overmatig voorschrijven en niet-klinisch gebruik van antibiotica. (Zelfs Alexander Fleming, de ontdekker van penicilline, waarschuwde al voor het gevaar in zijn Nobelprijzilezing in 1945: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/fleming-lecture.pdf>). Sindsdien zijn er herhaaldelijk soortgelijke waarschuwingen gegeven, soms met betrekking tot het gebruik van antibiotica in de viskweek (bijv. Cabello, 2006), maar met weinig resultaat. Tegenwoordig beschouwen we antibioticaresistentie als een van de belangrijkste uitdagingen in de geneeskunde omdat hierdoor een toenemend aantal voorheen behandelbare, levensbedreigende infecties niet langer behandeld kunnen worden.

(http://www.wpro.who.int/entity/drug_resistance/resources/global_action_plan_eng.pdf). In het internationale verslag *Tackling drug-resistant infections globally: final report and recommendations* (Mondiale aanpak van infecties die resistent zijn tegen geneesmiddelen: eindverslag en aanbevelingen; https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf) wordt het risico van antibioticaresistentie in 2050 voorspeld.

Dit kan dan leiden tot een cumulatieve 100 biljoen dollar aan kosten en 10 miljoen sterfgevallen per jaar die anders te vermijden waren⁵. Desondanks wordt voorspeld dat het niet-klinische gebruik van antibiotica in de veehouderij en de viskweek in de periode 2010-2030 zal toenemen met 67 procent.

(https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf). De huidige situatie was misschien totaal anders geweest, als de gezondheidsautoriteiten, politici en het bedrijfsleven (en, uitermate belangrijk, het grote publiek) hadden geweten dat microben zich snel kunnen ontwikkelen en snel nieuwe functionaliteit kunnen verspreiden als reactie op veranderingen in hun omgeving – in dit geval de massale introductie in het milieu van krachtige antimicrobiële stoffen – en de waarschuwingen van Falkow et al. dus op waarde hadden kunnen schatten.

De terugkeer van vrijwel uitgeroeide kinderziekten. Mazelen, kinkhoest en difterie zijn opnieuw opgekomen als gevolg van een afname van de acceptatie en de dekkingsgraad van vaccinaties, voortkomend uit een fundamenteel gebrek aan inzicht in het risico van vaccineren, de onderliggende microbiologie en onwetenschappelijke persoonlijke keuzes – aarzelen om te vaccineren – in landen waar deze ziekten vrijwel waren uitgeroeid. Dit was volledig te vermijden geweest (Lane et al., 2018).

De toename van allergieën. Ernstige infecties bij kinderen moeten krachtig worden bestreden, maar waarschijnlijk wordt de ontwikkeling van een gezond immuunsysteem bij zuigelingen bevorderd door mildere infecties en ruime blootstelling aan micro-organismen in hun omgeving (Bach, 2018). De toename van *microbiofobie* (angst voor micro-organismen) en reclamecampagnes die het beeld oproepen dat alle microben slecht zijn en uitgeroeid moeten worden om het veilig te maken in huis, kunnen aanzienlijk hebben bijgedragen aan de huidige explosie in onze samenleving van aandoeningen door een gebrekkig functionerend immuunsysteem (bijv. allergieën, astma, eczeem en zelfs neurologische stoornissen). Er is onlangs aangetoond dat een beschermend effect tegen huidkanker door huidmicroben wordt verminderd door het gebruik van agressieve antimicrobiële zeep (Nakatsuji et al. 2018). Zulke gevolgen hadden minder ernstig kunnen zijn met geschikt onderwijs over de noodzaak van een evenwicht tussen hygiënische praktijken om de druk van ziekteverwekkers te verminderen en

⁵ Het is interessant dat de eerste van de vier aanbevelingen de noodzaak van een *mondiale bewustwordingscampagne* is, met name gericht op kinderen en tieners. Vreemd genoeg maakte basaal onderwijs geen deel uit van de aanbevolen campagne, hoewel de kosten van de campagne werden geraamd op 40-100 miljoen dollar per jaar.

strategieën om een gezond microbioom te behouden. Zo'n microbioom voorziet ons namelijk van essentiële ecofysiologische diensten, waaronder een doeltreffende instructie van het immuunsysteem, via blootstelling aan microben van grond, dieren en planten (Finlay en Arrieta, 2016; Gilbert, Knight en Blakeslee, 2017).

De broeikasgascrisis. Microben produceren en verbruiken broeikasgassen (zie Caviccioli et al., 2019), dus inspanningen om enerzijds de microbiële uitstoot te verminderen en om anderzijds de consumptie te verhogen, zijn cruciaal. Bij de overweging om microben in te zetten om problemen op te lossen, is het absoluut noodzakelijk dat we de kwantitatieve aspecten begrijpen en het feit dat processen mogelijk niet lineair zijn. De vastlegging van het broeikasgas CO₂ door microben en planten verloopt traag in vergelijking met het vrijkomen ervan door verbranding van fossiele brandstoffen door de mens – de normale cyclus van de dingen is uit balans – en daarom stijgt het CO₂-gehalte van de atmosfeer snel: onze plantaardige en microbiële bondgenoten kunnen de menselijke activiteiten niet bijbenen. Broeikasgasemissies leiden tot het broeikaseffect, dat op zijn beurt leidt tot het ontdooien van permafrostgronden. Vervolgens ontstaat er nieuwe microbiële productie van methaan en CO₂, waardoor de gevolgen van het gebruik van fossiele brandstoffen worden versterkt en verergerd.

De productie van vlees, vooral afkomstig van herkauwers, gaat gepaard met flinke uitstoot van het broeikasgas methaan. Dat is een feit dat al lang bekend is. Vleesproductie is zelf gebaseerd op de productie van voedergewassen, die op haar beurt weer verband houdt met het gebruik van stikstofhoudende meststoffen. Ureum, dat door bodemmicroben wordt afgebroken tot ammoniak en het broeikasgas CO₂, heeft een lange geschiedenis van wijdverbreid gebruik als stikstofmeststof in de landbouw (hoewel het momenteel wordt uitgefaseerd). Andere stikstofhoudende meststoffen leiden tot microbiële productie van het extreem krachtige broeikasgas N₂O. (Daarnaast leiden ze uiteraard tot eutrofiëring: schadelijke algenbloei door afvloeien van nutriënten naar aangrenzend oppervlaktewater, waardoor zuurstofgebrek en vissterfte kunnen ontstaan en beperkingen moeten worden opgelegd aan het gebruik van aangetast oppervlaktewater). Het is duidelijk dat er belangrijke persoonlijke en beleidsbeslissingen moesten en nog steeds moeten worden genomen waar het gaat om meer vlees eten en produceren dan we daadwerkelijk nodig hebben.

De afvloeiing van nutriënten in waterwegen aan de kust leidt tot een snel zuurstofverbruik door de aanwezige microbengemeenschap, wat op zijn beurt bijdraagt aan de snelle uitbreiding van zones met gebrek aan zuurstof. Er zijn negen beperkende factoren geïdentificeerd voor een duurzame toekomst van de aarde, waaronder klimaatverandering, verlies van biodiversiteit en ozonafbraak. Daarbij is de stikstofcyclus geïdentificeerd als de meest prangende beperkende factor, omdat er nu zoveel van deze essentiële nutriënt via door de mens geproduceerde meststoffen wordt geleverd aan de biosfeer, dat dit alle natuurlijke processen overstijgt (Rockström et al., 2009). In veel landen is er momenteel een debat gaande over het beperken van het gebruik van deze meststoffen. Dit is uitermate lastig omdat de groeiende wereldbevolking gevoed moet worden en er voedsel geproduceerd moet worden tegen een betaalbare prijs voor de armere leden van de samenleving. Dat staat tamelijk los van de landbouw en de toeleveringsketens daarvan. Het lijkt logisch om boeren aan te moedigen het voortouw te nemen bij de besluitvorming en formulering van een degelijk beleid, omdat zij degenen zijn die de relatie tussen de veranderingen in bodemstikstof en de gewasopbrengst het beste begrijpen. Desalniettemin maakt de rol van micro-organismen bij de uitstoot van broeikasgassen door stikstofhoudende meststoffen zelden een belangrijk onderdeel uit van het beleidsdebat en het individuele en collectieve besluitvormingsproces. En dat zou toch moeten om dat soort discussies zinvol en effectief te maken. Meer in het algemeen gaan recente beleidsbeslissingen die de uitstoot van broeikasgassen beperken voornamelijk over uitstoot

door menselijke activiteiten en wordt in wezen voorbijgegaan aan het feit dat microben een cruciale rol spelen bij zowel de productie als de consumptie van aanzienlijke hoeveelheden broeikasgassen, waaronder N_2O en CH_4 , naast CO_2 . In elk geval worden we allemaal op verschillende manieren getroffen door de opwarming van de aarde en zijn we dus belangrijke belanghebbenden. De wereldwijde verspreiding van ziekteverwekkers en hun vectoren verandert door de opwarming van de aarde, zodat er ziekten ontstaan bij nieuwe populaties van mensen en dieren met een immuunsysteem dat daar niet eerder aan is blootgesteld, en bij planten die zich er niet eerder tegen hebben hoeven verdedigen. Daarbij kunnen epidemieën ontstaan.

De bodemcrisis De bodem is de essentiële huid van de aarde. Hij ondersteunt de plantengroei en is het thuis van een ongelooflijke diversiteit aan dieren en microben die voor een verbazingwekkende reeks biogeochemische processen zorgen, kenmerkend voor het functioneren van de bodem en bepalend voor de gezondheid ervan. De bodem filtert oppervlaktewater dat doorsijpelt naar waterhoudende grondlagen, die miljarden mensen van drinkwater voorzien. De bodem bevat kostbare voedingsstoffen en drie keer zoveel koolstof als de atmosfeer van de aarde. Maar de bodem is wereldwijd snel aan het eroderen, en eindigt vaak in beken, rivieren en oceanen, waarbij de nutriënten onderweg vrijkomen. In de meeste landen verdwijnt de toplaag van de grond vele malen sneller dan deze wordt geproduceerd door bodemvormende processen (erosie van rotsen). Steeds extremere weersomstandigheden verhogen de erosiesnelheid. Bodemmicro-organismen produceren polysacchariden die fungeren als lijm om de bodem structuur en stabiliteit te geven en daardoor de weerstand tegen erosie vergroten. Naar verwachting vóór het einde van de 21^e eeuw gaat een rampzalig hoeveelheid grond van het landbouwareaal op aarde verloren. Daardoor kan er niet voldoende voedsel worden geproduceerd om de wereldbevolking te voeden, en komen er enorme hoeveelheden nutriënten vrij waardoor het oppervlaktewater wordt vervuild en koolstof wordt afgegeven, zodat het broeikaseffect verergert. Om deze crisis af te wenden, is het absoluut noodzakelijk dat beleidsmakers beter gebruikmaken van op kennis gebaseerde strategieën om de microbiële activiteiten die de bodemstabiliteit verbeteren. Daarvoor is het eveneens noodzakelijk dat de wereldburgers, als centrale belanghebbenden, de ernst van het probleem en de beschikbare microbiële opties inzien. Maar dat kan alleen als mensen kennis over microbiologie verwerven.

Ophoping van verontreinigende stoffen in het milieu en de voedselnetwerken. Het is niet voldoende om te weten dat microben deelnemen aan een milieuproces, het is essentieel om te weten waar ze goed in zijn en waar ze minder goed in zijn. Historisch gezien werd en wordt al te gemakkelijk aangenomen dat microben met hun bekende metabole veelzijdigheid alle vervuilende stoffen opruimen die vrijkomen uit industrie, huishoudens, ziekenhuizen, enz., zonder rekening te houden met het feit dat er beperkingen kunnen zijn. Microben kunnen dan wel een ongelofelijke reeks organische materialen afbreken, maar het metabolisme van sommige is traag, soms erg traag. Dus als stoffen sneller worden geproduceerd en vrijkomen in het milieu dan dat ze kunnen worden afgebroken door de microben, hopen deze stoffen zich op en leiden ze tot vervuiling. Dat blijkt uit de vondst van langlevende (persistente) giftige chemicaliën zoals pcb's en dioxines in het huidige voedselnetwerk, tientallen jaren na het verbod op de productie ervan, en ook uit de momenteel aan de gang zijnde ramp van vervuiling door plastic uit de petrochemische industrie.

<i>We hebben te maken met allerlei ernstige problemen, zoals de sluipende verspreiding van de resistentie van ziekteverwekkers tegen geneesmiddelen die worden gebruikt als laatste optie, bodemerosie, het probleem van</i>

plastic in de oceanen en de gevolgen daarvan voor de gezondheid van wilde dieren, en de vorming en ophoping van microplastics in het voedselnetwerk. Deze problemen waren te voorspellen en in belangrijke mate te voorkomen geweest als

- beleidsmakers de waarschijnlijke resultaten van hun beslissingen over microbiologische processen en de langetermijngevolgen hadden kunnen begrijpen, en
- een groter spectrum van maatschappelijke belanghebbenden al veel eerder gemachtigd was geweest om de risico's van het hedendaagse beleid en gedrag te in te zien.

Het exposoom en het specifieke probleem van chronische langdurige blootstelling aan een lage hoeveelheid biologisch actieve stoffen. Een van de grote wereldproblemen die bijzonder relevant is voor de kwestie van kennis over microbiologie is de biologische en chemische vervuiling van de biosfeer. Menselijke beslissingen vormen namelijk zowel het probleem als de sleutel tot de oplossing. Beslissingen met te weinig oog voor microbiologische aspecten kunnen vervuilend beleid opleveren, terwijl met een goede microbiologische kennis gekozen kan worden voor beleid dat vervuiling tegengaat (*verminderen, remediëren, recyclen*). Biologische vervuiling, met name verontreiniging met uitwerpselen in grote stedelijke gebieden, kan nog steeds een probleem zijn in landen met lagere inkomens. In landen met hoge inkomens is dit grotendeels onder controle, maar ontstaan er soms problemen als gevolg van technische storingen of extreme weersomstandigheden. De geïndustrialiseerde vleesveehouderij voegt hier echter een extra dimensie aan toe door de grootschalige productie van dierlijk afval. De enorme hoeveelheden uitwerpselen uit de bio-industrie bevatten met antibiotica verrijkte en resistente microben, waaronder ziekteverwekkers. Hoewel een deel van dit afval onschadelijk wordt gemaakt in anaerobe gistingstanks, belandt een deel in het milieu, waar het een gevaar kan vormen.

De toxiciteit (mate van giftigheid) en levenscycli van nieuwe chemicaliën en geneesmiddelen worden over het algemeen geëvalueerd voordat deze producten in de handel komen. Dat soort evaluaties biedt echter meestal informatie over acute toxiciteit die in korte tijd kan worden vastgesteld, en dan vooral in standaardmodellen die weinig verband houden met de mogelijke specifieke inherente gevaren van de chemicaliën. De evaluatie van de acute toxiciteit voor de organismen die het meest direct worden beïnvloed en van chronische toxiciteit op een laag niveau, die zich op de lange termijn manifesteert, is uitermate lastig. Veel biologisch actieve chemicaliën, met name farmaceutische producten in afvalstromen van fabrieken en ziekenhuisafvalwater, zijn in zeer lage concentraties actief en sommige belanden onveranderd in het milieu via afvalverwerkingsinstallaties. Daarnaast worden bepaalde chemicaliën in het milieu gedeeltelijk afgebroken door micro-organismen. Daarbij kunnen nieuwe metabolieten ontstaan die niet zijn meegenomen in milieueffectbeoordelingen, die op andere manieren giftig kunnen zijn dan de oorspronkelijke chemicaliën, en die mogelijk zelfs giftiger zijn dan de chemicaliën die aanvankelijk in het milieu terechtkwamen. Chronische blootstelling aan lage concentraties van zulke chemicaliën en metabolieten kan verraderlijke gevolgen hebben op populatieniveau. Stoffen die heel veel voorkomen in het milieu, zijn onder andere xeno-oestrogenen – endocriene verstoorders (Monnert et al, 2017) – die ten minste gedeeltelijk worden beschouwd als verantwoordelijk voor de dalende vruchtbaarheid bij mensen en andere dieren, en insecticiden, die verantwoordelijk zijn voor afnemende aantallen bestuivers, zoals bijen (Godfray et al, 2015; Christen et al 2018).

Een ander, nog lastiger probleem is dat verschillende vervuilende chemicaliën in het milieu met elkaar vermengd raken. De impact van mengsels van chemicaliën op de gezondheid van mens en milieu is in essentie onbekend, vooral bij chronische blootstelling aan lage

concentraties, maar ongetwijfeld aanzienlijk. Microben hebben het vermogen, of kunnen dit ontwikkelen, om veel van zulke stoffen af te breken. Ze zullen vaak het belangrijkste middel zijn voor verwijdering ervan uit het milieu. Het is echter mogelijk dat ze andere stoffen niet kunnen afbreken, althans niet in zinvolle hoeveelheden. Dat is met name het geval wanneer deze stoffen een zeer lage concentratie hebben, en des te meer wanneer ze aanwezig zijn in complexe mengsels.

Samenvattend: we zullen meer te weten moeten komen over relevante microbiële processen en hoe deze te gebruiken, ondanks de complexiteit van biologische en chemische vervuiling, en het eveneens complexe microbiële vermogen om verontreinigende stoffen onschadelijk te maken. Dat is namelijk de enige manier om bestaande vervuiling te verminderen. Bij de verantwoorde ontwikkeling van nieuwe chemicaliën, waaronder stoffen die met synthetische microbiologie worden geproduceerd, moeten gedefinieerde eindpunten voor hun levenscyclus worden meegenomen. Maar, we zeggen het nogmaals: wat voor beperkingen de microbiële wereld ook heeft, dit blijft de enige factor waarop we kunnen rekenen om de uitzonderlijke vervuilingslast van de aarde tegen te gaan (de Lorenzo et al., 2016).

Het is essentieel dat we inzien wat de mogelijkheden en de beperkingen zijn van afbraak door micro-organismen, en dat we deze centraal stellen in de ontwikkeling van het beheer- en mitigatiebeleid, waardoor uiteindelijk onze mate van blootstelling aan milieuverontreinigende stoffen zal worden bepaald. Er is een gecoördineerd, coherent en duurzaam (wereldwijd) beleid nodig om

- de identificatie, de evaluatie en de monitoring van het type en de concentratie van bioactieve stoffen en mengsels daarvan, in onze omgeving, op lokaal, regionaal en mondiaal niveau te stroomlijnen,*
- ons inzicht te verbeteren in hoe deze stoffen van invloed zijn op de gezondheid van de aarde, gemeenschappen en individuen,*
- de inspanningen coördineren om ze uit het milieu te verwijderen, de giftige effecten ervan te verminderen en de toegang van deze stoffen tot en verplaatsing ervan via het voedselnetwerk te verminderen, en*
- maatregelen te ontwikkelen om onze mate van blootstelling aan zulke verontreinigende stoffen te verminderen.*

Mondiale verbondenheid en microbiële reacties op verandering. Ten slotte, maar daarom niet minder belangrijk, moeten twee essentiële kenmerken van de aarde worden benadrukt. Ten eerste onderlinge verbondenheid: het volledige aardoppervlak en de atmosfeer zijn verbonden door water, wind en mechanische toeleveringsketens van menselijke producten. Hierdoor wordt veel van wat zich aan het aardoppervlak en in de atmosfeer bevindt verplaatst via land, zee en lucht, soms over duizenden kilometers. Een algemeen erkend gevolg van deze *fysieke verbondenheid* is het transport van afvalplastic naar alle delen van de oceanen, ver van de plaats waar het wordt weggegooid. Verder worden giftige polychloorbifenylen (pcb's) teruggevonden in pooldieren, extreem ver verwijderd van de plaatsen waar deze stoffen worden geproduceerd en gebruikt. Dus zelfs als de potentiële gevaren van een chemische stof goed kunnen worden beheerd in de omgeving waar deze stof wordt geproduceerd, kunnen verbondenheid en distributiemechanismen leiden tot problemen op afstand. Maar ook biologische agentia dragen bij aan verbondenheid en verplaatsing in de biosfeer, door actieve en passieve beweging. Denk bijvoorbeeld aan vliegende insecten, vogels en mensen in

vliegtuigen, aan zwemmende en drijvende waterorganismen e.d., en aan zaden, pollen en plankton die zweven in lucht of water. Voorbeelden van de gevolgen van *biologische verbondenheid* zijn de explosieve wereldwijde verspreiding van het ernstig acuut luchtwegensyndroom (severe acute respiratory syndrome, SARS) in 2003, de jaarlijkse griep epidemie afkomstig uit Azië, een uitbraak van enterohemorragische *E. coli* (EHEC) in Duitsland, overgedragen via organische fenegriekkiemen die uit Egypte werden geïmporteerd, en de uitbreiding van ziektes door de toegenomen immigratie, bijvoorbeeld de toename van tuberculose in Afrikaanse landen zoals Marokko en door teken overgebrachte Afrikaanse virussen in Spanje. De internationale handel speelt ook een belangrijke rol bij de verspreiding van ziekteverwekkers. Hierdoor is wellicht de huidige geografische spreiding veroorzaakt van diverse plantenziekten die worden veroorzaakt door *Xylella fastidiosa*. Dat is een van de ernstigste plantenziekteverwekkers ter wereld, met een gigantische economische impact op de landbouw, openbaar groen en het milieu. In tegenstelling tot veel door vectoren overgebrachte ziekteverwekkers, die waardspecifieke vectoren en dus een beperkt waardbereik hebben, wordt *X. fastidiosa* overgedragen door een groot aantal vectoren die zich voeden met plantensap, waardoor deze ziekteverwekker vele waardplantsoorten aangetast. Ballastwater in schepen dat op diverse punten op de wereld wordt ingenomen en geloosd kan leiden tot nieuwe populaties van niet-inheemse en soms gevaarlijke organismen, zoals giftige algensoorten, waardoor problemen met de biologische veiligheid ontstaan. En woestijnstof dat rijk is aan fosfor, ijzer en microben, wordt door luchtstromingen naar verre plaatsen getransporteerd: stof uit de Sahara valt regelmatig in Europa neer en brengt nutriënten in het water van de Golf van Mexico en de Sargassozee, waardoor daar algenbloei kan ontstaan.

Via water en lucht worden niet alleen langlevende chemicaliën, waaronder radioactieve materialen, verspreid in de biosfeer en de atmosfeer, maar ook kleine, bijna gewichtloze microben. Maar: in tegenstelling tot chemicaliën kunnen microben zich voortplanten, zodat ze elke locatie die ze gunstig vinden op opportunistische wijze kunnen koloniseren en beïnvloeden. De wereldwijde verspreiding van microben is samengevat in de volgende mantra: *alle microben zijn overal*. Een andere, misschien meer zinvolle, mantra zou de volgende kunnen zijn: *als microben kunnen profiteren door ergens een proces te beïnvloeden, zijn ze daar en maken ze gebruik van dit vermogen*.

Een tweede belangrijk kenmerk van de aarde is het feit dat veranderingen die door natuurlijke gebeurtenissen of door toevallige of opzettelijke acties van mensen worden veroorzaakt, vaak een reactie uitlokken, soms onverwacht. Dat kan een consequentie opleveren waar geen rekening mee is gehouden. Dit kan te wijten zijn aan fysisch-chemische reacties, of vaak aan biologische, vooral microbiologische, reacties. De Macondo-/Deepwater Horizon-olieramp in 2010 in de Golf van Mexico leidde bijvoorbeeld tot de bloei van bacteriën in de waterkolom en het sediment. Dit waren bacteriën die buitengewoon goed aangepast waren aan het verbruik van olie-koolwaterstoffen. De olievoorraden in dit gebied hebben honderdduizenden tot miljoenen jaren lang voortdurend gelekt. Daardoor zijn er micro-organismen geëvolueerd en vervolgens overal verspreid, die de olie konden assimileren toen deze door de ramp beschikbaar kwam. Er werd geprobeerd om de microbiële afbraak van de olie te versnellen door toevoeging van chemische dispergeermiddelen om het oliedruppeloppervlak te vergroten, maar dit had uiteindelijk een remmend effect op sommige van deze bacteriën en verminderde daardoor het inherente vermogen van de omgeving om de verontreinigende stof af te breken (Paris et al, 2018).

Wanneer we dus besluiten om een bepaalde soort activiteiten te ondernemen, moeten we er – naast de gebruikelijke overwegingen van haalbaarheid, kosten, logistiek e.d. – ook rekening mee houden dat microben geen passieve toeschouwers zijn als de mens het milieu

aanzienlijk verandert, al dan niet met opzet. Ze reageren actief op de gevolgen van onze activiteiten, en beïnvloeden deze daardoor, zowel positief als negatief. We moeten bij het bespreken van een proces altijd de volgende vragen stellen: spelen microbiële activiteiten er direct of indirect een rol bij of worden ze erdoor beïnvloed? En zo ja, hoe reageren ze mogelijk/waarschijnlijk op de voorgestelde activiteit? Helaas kunnen we vooralsnog niet praten met microben, dus we kunnen niet vragen wat ze gaan doen als wij iets veranderen. Daarom is het absoluut noodzakelijk dat we wetenschappelijk onderbouwde voorspellingen doen op basis van monitoring en modellering van de reactie van microben op veranderingen in het milieu. Daarnaast is voorzichtigheid geboden. Het aloude motto is *denk mondiaal, handel lokaal*. Wellicht doen we dat motto geweld aan als we mensen aansporen om *lokaal te handelen, maar alleen na voldoende rekening te hebben gehouden met mogelijk bijkomende gevolgen op lokaal, regionaal en mondiaal niveau (ook gevolgen waar we in eerste instantie niet bij stilstaan en die misschien niets te maken hebben met het onderwerp in kwestie)*.

Voordat we activiteiten ontplooiën, moeten we er rekening mee houden dat alles op aarde onderling verbonden is. Daarvoor moeten we het volgende kunnen:

- *kritisch beoordelen van de mogelijke spillover-effecten, de mate van impact en de relevante paden van lokale acties op microbiologische activiteiten in regio's in de buurt en verder weg en op mondiaal niveau,*
- *geschikte methoden gebruiken om de impactscenario's, inclusief de duur van de effecten en de tegenmaatregelen, goed in te kaart brengen,*
- *zorgvuldig overwegen van alternatieve handelwijzen wanneer we op basis van conservatieve aannames geen vertrouwen hebben in onze voorspellingen, en*
- *bewaken, beoordelen en verbeteren van het beleid, en lokale instanties machtigen om ongecoördineerde of frauduleuze activiteiten te voorkomen die onbedoeld of anderszins nadelige effecten kunnen hebben.*

Het probleem

Het probleem is dat de kennis over microben en hun activiteiten momenteel geconcentreerd is bij een kleine groep specialisten, de microbiologen. De maatschappij heeft uiteraard altijd gebruik gemaakt van specialisten om beleidsmakers te adviseren, bijvoorbeeld economen om regeringen te adviseren over de kosten van het doorvoeren van nieuw beleid. Het probleem is hier dat microbiële activiteiten zo enorm wijdverspreid zijn en dat ze zo een rechtstreekse en nauw verbonden invloed hebben op de dagelijkse beslissingen van iedereen in de samenleving. In de meeste situaties is het dan ook onpraktisch of onmogelijk om op korte termijn een microbioloog te raadplegen of te ondervragen over microbiologische kennis, ondanks toegang

tot relevante informatie via internet. We hebben dus enerzijds microbiologen die weinig invloed hebben op beleidsniveau, van laag tot hoog, en anderzijds beleidsmakers en besluitvormers die de essentiële kennis voor weloverwogen beslissingen missen. *Hoe pakken we de crises waarmee we worden geconfronteerd doeltreffend aan als de beleidsmakers en de belanghebbenden noch de onderliggende oorzaken van de crises, noch mogelijke oplossingen (bijv. Brüssow, 2017) kunnen begrijpen of beoordelen?*

Als we willen voorkomen dat foutpatronen uit het verleden, die tot catastrofale uitkomsten van de hierboven beschreven soort hebben geleid, worden herhaald, moet de essentiële informatie die aan de basis van de juiste perceptie van problemen, de juiste keuzes en optimale en wetenschappelijk onderbouwde beleidsbeslissingen ligt onlosmakelijk onderdeel uitmaken van onze individuele en collectieve kennisbasis. Om vermijdbare, rampzalige gebeurtenissen in de toekomst te voorkomen, moet er meer kennis over microbiologie komen.

- *Daarbij gaat het om basiskennis over microbiologische processen en activiteiten, wederzijdse interacties en onderlinge afhankelijkheden als onderdeel van het publieke bewustzijn, maar ook*
- *om aanvullende kennis over deze processen bij de desbetreffende beleidsmakers. Verder moet*
- *bij besluitvormingsprocessen veel beter dan nu gebruikgemaakt worden van wetenschappelijk onderbouwde criteria en beoordeling door deskundigen.*

Op weg naar een oplossing: verwerven van kennis over microbiologie in de maatschappij

Essentiële onderdelen van de microbiologie moeten deel gaan uitmaken van het basale onderwijs. Voor sommige leden van de samenleving, zoals onderwijzers, politici, captains of industry, hoofden van nationale en internationale instanties e.d. is de behoefte aan kennis over microbiologie het grootst, omdat hun beslissingen een grotere maatschappelijke impact hebben dan die van anderen. Alle individuen nemen beslissingen en ontplooiën dagelijks praktische activiteiten waarbij micro-organismen zijn betrokken. We zijn bovendien allemaal belanghebbenden bij belangrijke beleidsbeslissingen met invloed op de gezondheid en het welzijn van onszelf en van de aarde. We hebben kennis over microbiologie nodig om onze burgerrechten uit te oefenen en onze verantwoordelijkheden te vervullen om besluitvormers op een competente manier te informeren, als kiezers of als leden van belangengroepen. Er is dus een cruciale behoefte aan *kennis over microbiologie* in alle gelederen van de samenleving: *kennis over microbiologie moet een onderdeel worden van de taakomschrijving van volwassenen.*

Algemene ontwikkeling en een kritisch beoordelingsvermogen, dingen die kinderen leren op school, worden over het algemeen als essentieel beschouwd voor de overgang naar de volwassenheid. Tot nu toe worden de moedertaal, een vreemde taal, geschiedenis, aardrijkskunde, actualiteit, wiskunde, natuurkunde, scheikunde, biologie e.d. beschouwd als essentiële vakken in een evenwichtige opleiding. Dat wil zeggen dat we vinden dat alle kinderen over deze onderwerpen moeten leren, zodat we allemaal als volwassene verantwoordelijkheid kunnen nemen voor gezin en werk, noodzakelijke nieuwe informatie kunnen verwerken op persoonlijk en professioneel vlak, en productieve dagelijkse beslissingen kunnen nemen op onze weg over het kronkelige levenspad. Wij menen dat de kennis en het begrip van microben en de activiteiten daarvan net zo belangrijk zijn voor het algemene onderwijs als deze vakken.

Microbiologie moet een kernelement van het lesplan op scholen worden, zodat besluitnemers op de hoogte zijn van de juiste informatie en alle andere belanghebbenden basiskennis hebben van de nauwe verbondenheid van de samenleving en haar activiteiten met de microbiële wereld om ons heen. Zo krijgen maatschappelijke belanghebbenden de handvatten

- om weloverwogen beslissingen te nemen voor zichzelf (en voor anderen, bijv. hun kinderen),
- om kritisch de voors en tegens van alternatieve besluiten te beoordelen en daarmee weloverwogen te laten weten waar hun voorkeur ligt aan degenen die namens hen beslissingen nemen, en
- om anderen ter verantwoording te roepen als zij geen beslissingen nemen op basis van wetenschappelijk bewijs.

Een persoonlijk ervaringsgericht lesconcept en -formaat voor alle leeftijdsgroepen, met de nadruk op de grote wereldproblemen en Duurzame Ontwikkelingsdoelen. Omdat microben ons leven beïnvloeden vanaf dag 1 (en zelfs al ver daarvoor), moet de microbiologie een plaats krijgen vanaf het begin van het basisonderwijs en een rode draad vormen in alle onderwijsniveaus. Zo leren besluitvormers, hoog en laag, om geïnformeerde beslissingen te nemen over de beste werkwijzen, en krijgen jong en oud de kennis om te begrijpen waar zulke beslissingen op zijn gebaseerd. Mensen moeten het verschil begrijpen tussen wat tamelijk zeker is, wat waarschijnlijk is en wat onbekend is. Individuen moeten wetenschappelijk onderbouwde risico-batenanalyses kunnen maken om beslissingen te nemen over in principe voordelige activiteiten die een bepaald risico met zich meebrengen, of om opbouwend contact te hebben met de instanties die zulke beslissingen nemen namens hen. En zij moeten weten welke nieuwe kennis nodig is om in de toekomst het beste, wetenschappelijk onderbouwde beleid te kunnen voeren.

We voorzien lesplannen over microbiologie voor het kleuter-, basis- en voortgezet onderwijs, en daarnaast microbiologische onderwijsprogramma's voor lerarenopleidingen in het hoger onderwijs. Zulke lesplannen zouden ook beschikbaar moeten zijn als overheidsdienst voor bijscholing van mensen met kennis over microbiologie, en van degenen die hierover niets hebben geleerd op school, zodat zij de basis kunnen leren en op de hoogte kunnen blijven van de laatste ontwikkelingen. Hoewel de ontwikkeling van deze leerplannen de verantwoordelijkheid zal zijn van de betrokken onderwijsinstanties stellen we aantal onderwerpen voor om de implementatie ervan te vereenvoudigen, – een kader voor de kennis over microbiologie⁶ – en een lesvorm met een eenvoudige beginvraag die te maken heeft met het leven van alledag, gevolgd door uitleg in eenvoudige taal over de onderliggende microbiologie, de relevantie ervan voor de grote wereldproblemen en SDG's, de relatie met processen in de biogeosfeer en de gezondheid van de aarde en, heel belangrijk, de gevolgen voor de besluitvorming⁷.

⁶ Microbiology education in school and pre-school: a child experience-centric framework, Timmis, K. N. et al, in voorbereiding

⁷ bijv. Papa, ik heb wel zin in een hamburger als we vanmiddag gaan bowlen, maar Jiske vertelde gisteren dat koeien bijdragen aan het broeikaseffect. Is dat zo? (Broeikasgassen, sources en sinks, pensvertering, methaanuitstoot, broeikaseffect, stijgende zeespiegel en extreme weersomstandigheden, hoe beïnvloeden ze ons, SDG-13: Bestrijden van klimaatverandering); Mama, op school hoorden we dat Joanne de mazelen heeft: waarom was ze niet ingeënt, zoals ik? (werking van vaccins, risico's, correlaties en causaliteit, risico's: overwegen van de voordelen, kudde-immuniteit, bijkomende voordelen van vaccinatie, SDG 3: Verzekeren van een gezond leven); Mama, je zegt altijd dat ik mijn handen moet wassen als ik naar de wc ben geweest, omdat

Deze aanpak heeft als voordeel dat al aan het begin van de les duidelijk is voor de leerlingen waarom onderliggende microbiologie relevant/belangrijk is voor de samenleving duidelijk wordt voor

De selectie van onderwerpen is bedoeld om

- *hulp te bieden bij het ontwikkelen van passende leerplannen voor verschillende leeftijdsgroepen in verschillende maatschappelijke en culturele context,*
- *duidelijk te maken wat de belangrijkste processen en problemen van de aarde, biosfeer en mensen zijn, die door microbiële ecofysiologische activiteiten beïnvloed of verstevigd worden,*
- *informatie te geven over hoe deze activiteiten ons welzijn en dat van andere bewoners van de biosfeer beïnvloeden,*
- *duidelijk te maken hoe microbiële activiteiten beïnvloed worden door onze activiteiten en de consequenties die daaruit voortvloeien,*
- *aan te geven hoe we microbiële activiteiten kunnen sturen of exploiteren voor voordeel op het niveau van het individu, de mensheid en de aarde, en kunnen bijdragen aan het bereiken van de SDG's,*
- *te laten zien wat onze plaats is in de wereld in brede zin, en hoe we microbieel verbonden zijn in de 'global village' en met de rest van de biosfeer.*

Het kader voor kennis over microbiologie zal in eerste instantie bestaan uit een honderdtal ervaringsgerichte onderwerpen, ondergebracht in de categorieën Menselijk Welzijn, Aarde, Water, Planten, Dieren, Eten-en-Drinken, en Biotechnologie. Deze komen binnenkort gratis online beschikbaar. Deze onderwerpen zullen in de loop van de tijd zeker worden verbeterd en verfijnd.

Het moet benadrukt worden dat microbiologieles bijzonder boeiend kan zijn voor de leerlingen, ook al zijn de besproken onderwerpen, de microben, onzichtbaar. De microbiologie is namelijk een praktisch vak dat zich heel goed leent voor schitterende experimenten voor leerlingen van allerlei leeftijden en niveaus. Er komen ook suggesties online voor eenvoudige experimenten die relevant zijn voor elke onderwerpcategorie. Bovendien zijn er veel interessante microbiële processen bij bedrijven (brouwen, kaasmaken, broodproductie, fermentatie enz.) en openbare instanties (afvalverwerkingsinstallaties, diagnostische laboratoria enz.), die de leerlingen, afhankelijk van wat er in de buurt beschikbaar is, zelf kunnen ervaren tijdens excursies met school. Er wordt ook een illustratieve lijst van mogelijke excursies online beschikbaar gesteld. met ideeën voor leerkrachten over hoe ze de ervaring zo kunnen organiseren dat de leerlingen er zoveel mogelijk van leren, en het zo leuk en interessant mogelijk vinden.

poep smerig is. Maar wat gebeurt er nadat het weggespoeld is? (Afvalwaterbehandeling, ziekteverwekkers in uitwerpselen, fecale indicatoren als indirecte methode om de hoeveelheid ziekteverwekkers in uitwerpselen en de waterkwaliteit te bepalen, SDG 6: Sanitaire voorzieningen voor iedereen); Juf, waarom groeien planten niet in het donker? (Planten en fotosynthetische microben vangen zonne-energie op en maken biomassa aan: de basis van het voedselnetwerk; fotosynthese, chloroplasten en mitochondriën zijn ontstaan uit vroege microben; planten en fotosynthetische microben voorzien de wereld van voedsel, energie, hernieuwbare chemische grondstoffen, niet-vervuilende, duurzame ontwikkeling, SDG 2: Een einde maken aan honger, SDG 7: Toegang verzekeren tot duurzame energie, SDG 12: Duurzame productiepatronen verzekeren)

De onderwerpen in het kenniskader vormen geen uitputtende opsomming en ze zijn ook niet zo opgezet dat ze in hun geheel moeten worden behandeld voor een doelgroep van een bepaalde leeftijd. Met uitzondering van een paar inleidende onderwerpen zijn de meeste onderwerpen op zichzelf te begrijpen. Daarom vormen ze een modulair systeem om zelf uit te kiezen en een programma op te stellen, afhankelijk van de voorkeuren van de leerkracht en de leerstijlen en doelstellingen van de leerlingen. Het overkoepelende doel is echter dat de kinderen in de loop van hun schooltijd vertrouwd raken met alle onderwerpen.

We benadrukken dat het niet de bedoeling is om *kennis over microbiologie* bij te brengen door les te geven in microbiologie als vak en microbiologieprofessionals op te leiden. De bedoeling is daarentegen om voldoende basiskennis te leveren over de specifieke microbiële activiteiten die een centrale rol spelen voor de samenleving, zodat verbeteringen in het dagelijks leven, een wetenschappelijk onderbouwde beleidsontwikkeling en een goed beheer van de aarde worden bewerkstelligd.

Er heerst nog steeds een wijdverbreid vooroordeel dat microben onze vijanden zijn. De maatschappij moet snel tot het besef komen dat dat niet alleen onjuist is, maar ook leidt tot gevaarlijke praktijken. Microben zijn net als mensen: de meeste hebben niet of nauwelijks rechtstreekse invloed op ons leven, veel ervan zijn zeer nuttig, en maar een paar ervan zijn gevaarlijk voor ons. En net als bij mensen zijn het de slechteriken, de soorten die ziektes of materieel bederf veroorzaken, die het meeste in de belangstelling staan en waarover we het meest weten. Het is echter uiterst belangrijk dat we micro-organismen als geheel afschilderen als onze bondgenoten. Ze helpen ons niet alleen stilletjes in ons leven, maar we kunnen er een beroep op doen om grote problemen op te lossen, zoals gebrek aan voedsel. Vooral de onmisbare microbiële 50 procent van onze eigen lichaamscellen moeten worden voorgesteld als naaste familie.

Meer kennis over microben in de samenleving is uiterst belangrijk om af te komen van angst voor micro-organismen, een schadelijke overtuiging die leidt tot schadelijke praktijken. Dit is een van de cruciale boodschappen van de steun voor kennis over microbiologie, en zal een centrale rol innemen bij het gebruik ervan in lesplannen voor scholen.

Aan de slag!

Macro-organismen – dieren en planten – zijn niet alleen belangrijke leden van de biosfeer, maar ze maken ook onlosmakelijk onderdeel uit van de menselijke samenleving, evolutie, beschaving en de menselijke psyche zelf. Als gedomesticeerde soorten bieden ze voedsel, comfort, plezier en welzijn, en als wilde soorten zijn ze een bron van verwondering, tijdverdrijf en diversiteit. Het behoud van *macro-organismen* is onze primaire verantwoordelijkheid. Het resultaat is dat de biologie – in feite de biologie van dieren en planten – van oudsher een basisvak in het onderwijs is, op zichzelf en als fundament voor het onderwijs van de menselijke biologie en seksuele voorlichting. De afgelopen jaren is er veel meer interesse en waardering voor de *macro-organismen* ontstaan door de zeer populaire televisiedocumentaires die werden gepresenteerd door David Attenborough.

(<https://www.theatlantic.com/science/archive/2016/05/every-episode-of-david-attenboroughs-life-series-ranked/480678/>). Daarentegen bevinden microben, vanwege hun omvang meestal onzichtbaar voor het algemene publiek zich dus over het algemeen niet op de radar. Uit het oog, uit het

hart, behalve wanneer ze leiden tot een nieuwswaardige chaos, zoals aids, ebola en algenbloei. Dit onzichtbare onderdeel van de biosfeer wordt grotendeels verwaarloosd in het algemene onderwijs. Er zijn de laatste tijd verbazingwekkende ontdekkingen gedaan over microbiomen en de uiteenlopende invloed ervan op onze eigen biologie en ons gedrag, en daardoor is de aandacht voor microben bij het brede publiek wel aanzienlijk toegenomen. Toch blijven microben in wezen abstract. Ze zijn minder begrijpelijk dan het internet, en bevinden zich wat dat betreft op hetzelfde niveau als de werking van het geheugen. Maar ze zijn ontelbare malen belangrijker dan het internet. Voordat er internet kwam, bleven we gewoon in leven. Zonder microben hadden we nooit overleefd, dat zou niet gekund hebben zonder onze microbiële, levensondersteunende systemen. Nu is de microbiële wereld, met zijn eigen verbazingwekkende schoonheid die alleen maar te zien is onder de microscoop, nog abstract. Het is absoluut noodzakelijk dat deze wereld zichtbaar en tastbaar wordt en zijn rechtmatige positie in de menselijke psyche inneemt. Visuele hulpmiddelen krijgen dus een centrale rol in het microbiologieonderwijs, en de razendsnel opkomende arena van de microbiële kunst (bijv. <https://www.bbc.com/news/uk-england-oxfordshire-45099420>) zal de verbeelding stimuleren. Het moet een gewoonte worden voor kinderen om onmiddellijk voor zich te zien hoe microben eruitzien en wat ze doen. Naarmate micro-organismen minder abstract worden en concreet vorm aannemen, worden ze echt. Kinderen krijgen hun favoriete microbe! Stomende Methano, kronkelige Spirillum en stekelige Diatoma, allemaal met hun eigen ('menselijke') karakter dat creatieve speelgoedfabrikanten voor hen hebben bedacht, krijgen een plaats naast schattige knuffelberen en wollige schapen, Het hoeft zelfs niet lang te duren voordat ze de hoofdrol krijgen in tekenfilms.

Het Hoofdartikel heft drie fundamentele doelstellingen. Deze doelstellingen worden in hun context geplaatst in Fig. 1, een stappenplan voor de introductie van de kennis over microbiologie in lesprogramma's op scholen

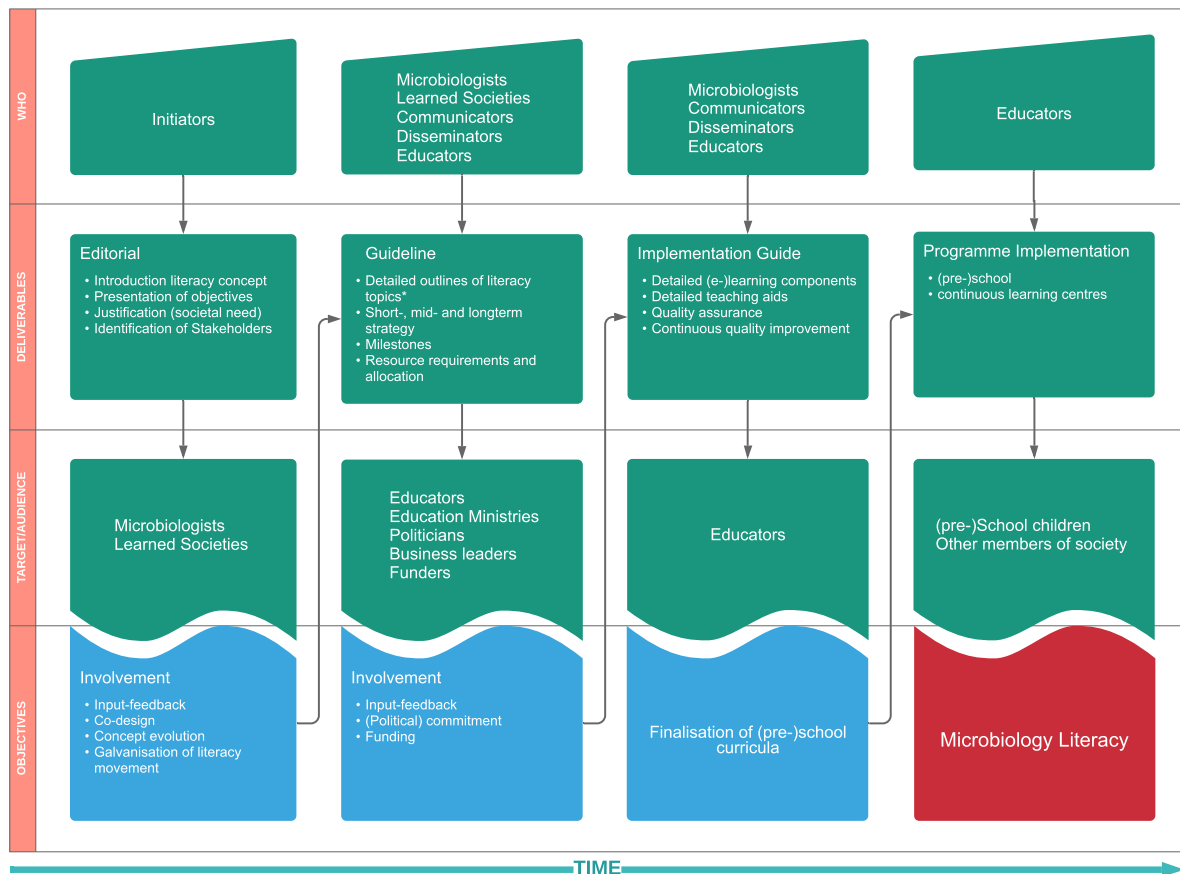


Fig. 1 Initiatief voor kennis over microbiologie.

* *Microbiology education in school and pre-school: a child experience-centric framework*, Timmis, K. N. et al, in voorbereiding

De eerste doelstelling van het initiatief is aan het licht brengen welke cruciale kennis en vaardigheden ontbreken in de samenleving, die nodig zijn om adequate, wetenschappelijk onderbouwde beslissingen te nemen over allerlei persoonlijke en maatschappelijke kwesties. Verder moeten de argumenten worden geformuleerd voor een samenleving met *kennis over microbiologie*, wat is te bereiken door opname van een kader met de belangrijkste microbiologische thema's in het basale onderwijs.

De tweede doelstelling is microbiologen, microbiologische genootschappen en professionals met kennis over microbiologie aanmoedigen om deel te nemen en bij te dragen aan dit initiatief door mee te helpen bij het verder ontwikkelen van het basiskader, door ideeën aan te dragen voor onderwerpen, filmpjes en experimenten in de klas. Daarnaast kunnen zij bijdragen door het ontwikkelen en zoeken naar financiering voor het ontwikkelen van de benodigde leermiddelen en leermaterialen, het vergroten van de impact en door de boodschap over te brengen naar onderwijzers, beleidsmakers, het bedrijfsleven en relevante overheids- en particuliere instanties.

En de derde, belangrijkste doelstelling van dit Hoofdartikel is het op gang brengen en faciliteren van een internationale inspanning om de boodschap over *kennis over microbiologie* over te brengen naar onderwijzers, politici, bedrijfsleiders en andere leidende figuren, om hen te overtuigen van de noodzaak van dit voorstel (*we zijn allemaal belanghebbenden op het gebied van de gezondheid van de aarde en onszelf: kunnen we het ons echt veroorloven om een fundamentele basis te negeren van ons vermogen om huidige crises op te lossen?*), en stimuleren dat de stap wordt gezet naar de volgende fase, implementatie van dit voorstel. We hebben in dit Hoofdartikel, waar mogelijk, alledaagse taal gebruikt en gespecialiseerde termen vermeden, zodat het voor

meerdere doelgroepen kan worden gebruikt. We dringen erop aan bij microbiologen en microbiologische genootschappen met contacten en invloed onder onderwijzers, politici, captains of industry en anderen om dit Hoofdartikel en andere relevante teksten en materialen te gebruiken om deze contacten te activeren, de essentiële boodschap over te brengen en steun te zoeken voor de inspanning om *kennis over microbiologie* in de samenleving te realiseren.

Literatuurlijst

- Bach, J.-F. (2018) The hygiene hypothesis in autoimmunity: the role of pathogens and commensals. *Nat Rev Immunol* **18**: 105-120
- Bartlett, J.G. (1979) Antibiotic-associated pseudomembranous colitis. *Rev Infect Dis* **1**: 530-539.
- Brown, J.M., en Hazen, S.L. (2015) The gut microbial endocrine organ: bacterially derived signals driving cardiometabolic diseases. *Annu Rev Med* **66**: 343-359
- Brüssow, H. (2017) Infection therapy: the problem of drug resistance – and possible solutions. *Micro Biotech* **10**: 1041-1046.
- Cabello, F.C. (2006) Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: a growing problem for human and animal health and for the environment. *Environ Microbiol* **8**: 1137-1144.
- Caselli, E. (2017) Hygiene: microbial strategies to reduce pathogens and drug resistance in clinical settings. *Micro Biotech* **10**: 1979-1983.
- Caviccioli, R. Ripple, W.J., Timmis, K.N. et al et al (2019), Scientists' warning to humanity: microorganisms and climate change. submitted
- Christen, V., Kunz, P.Y. en Fent, K (2018) Endocrine disruption and chronic effects of plant protection products in bees: Can we better protect our pollinators? *Environ Pollut* **243**: 1588-1601.
- Curtis, T. (2006) Microbial ecologists : it's time to 'go large'. *Nat Rev Microbiol* **4** : 488
- Du Toit, A. (2019) The gut microbiome and mental health. *Nat Rev Microbiol* <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0163-z>
- Falkow, S., Marmur, J., Carey, W.F. et al. (1961) Episomic transfer between *Salmonella typhosa* and *Serratia marcescens*. *Genetics* **46**:703-706
- Falkow, S. (1970) Antibiotics in animal feeds. *N Engl J Med* **282**: 693-4.
- Falkow, S. (1975) *Infectious Multiple Drug Resistance* (Pion Ltd, London)
- Finlay, B.B. en Arrieta, M.-C. (2016) Let them eat dirt. Greystone Books
- Garcia, J.L, de Vicente, M. en Galan, B. (2017) Microalgae, old sustainable food and fashion neutraceuticals. *Micro Biotech* **10**: 1017-1024.
- Gilbert, J.A. en Yee, A.L. (2016) Is triclosan harming your microbiome? *Science* **353**: 348-34
- Gilbert, J.A., Knight, R. en Blakeslee, S. (2017) Dirt is Good. St Martin's Press
- Godfray, H.C., Blacquière, T., Field, L.M. et al (2015) A restatement of recent advances in the natural science evidence base concerning neonicotinoid insecticides and insect pollinators. *Proc Biol Sci* **282**: 20151821
- Gomez de Agüero, M., Ganai-Vonarburg, S.C., Fuhrer, T., et al. (2016) The maternal microbiota drives early postnatal innate immune development. *Science* **351**: 1296-302
- Hobbie, S.E., Finlay, J.C., Janke, B.D. et al (2017) Contrasting nitrogen and phosphorus budgets in urban watersheds and implication for managing urban water pollution. *Proc Natl Acad Sci USA* **114**: 4177-4182
- Lane, S., Noni E. MacDonald, N. E., Marti, M. en Dumolard, L. (2018) Vaccine hesitancy around the globe: Analysis of three years of WHO/UNICEF Joint Reporting Form data-2015-2017. *Vaccine* **36**: 3861-3867.

Lee, S.Y., Kim, H.U., Chae, T.U. et al (2019) A comprehensive metabolic map for production of bio-based chemicals. *Nature Catalysis* 2: 18-33

Levy, S. B., FitzGerald, G. B. en Maccone, A. B. 1976. Spread of antibiotic-resistant plasmids from chicken to chicken and from chicken to man. *Nature* 260: 40-42

Levy, S. B. 1982. Microbial resistance to antibiotics. An evolving and persistent problem. *Lancet* 8289: 83-88

de Lorenzo, V. (2017) Seven microbial bio-processes to help the planet. *Micro Biotech* 10: 995-998.

de Lorenzo, V., Marliere, P. en Sole, R. (2016) Bioremediation at a global scale: from the test tube to planet Earth. *Micro Biotech.* 9: 618-625

Microbial Biotechnology (2017) The contribution of microbial biotechnology to sustainable development goals. *Micro Biotech* 10: 979-1274

Milani, C., Duranti, S., Bottacini, S. et al. (2017) The first microbial colonizers of the human gut: composition, activities, and health implications of the infant gut microbiota. *Microbiol Mol Biol Revs* 81: e00036-17

Monneret, C. (2017) What is an endocrine disruptor? *Comptes Rend Biol* 340: 403-405

Moossavi, S., Miliku, K., Sepehri, S., Khafipour, E. en Azad, M.B. (2018) The prebiotic and probiotic properties of human milk: implications for infant immune development and pediatric asthma. *Front Pediatr* 6: 197. doi: 10.3389/fped.2018.00197

Motta, E.V.S., Raymann, K. en Moran, N.A. (2018) Glyphosate perturbs the gut microbiota of honey bees. *Proc Natl Acad Sci USA* 115: 10305-10310

Nakatsuji, T., Chen, T.H., Butcher, A.M. et al (2018) A commensal strain of *Staphylococcus epidermidis* protects against skin neoplasia. *Sci Adv* 4: eaao4502

Nielsen, P.H. (2017) Microbial biotechnology and circular economy in wastewater treatment. *Micro Biotech* 10: 1102-1105.

Paris, C.B., Berenshtein, I., Trillo, M.L. et al (2018) BP Gulf Science Data Reveals Ineffectual Subsea Dispersant Injection for the Macondo Blowout. *Front Mar Sci* 5: DOI: 10.3389/fmars.2018.00389

Richards, S., Paterson, E., Withers, P.J.A. en Stutter, M. (2015) The contribution of household chemicals to environmental discharges via effluents: combining chemical and behavioural data. *J Environ Manage* 150: 427-434

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. et al (2009) A safe operating space for humanity. *Nature*. 461:472-475

Rossen, N.G., MacDonald, J.K., De Vries, E.M., D'Haens, G.R., De Vos, W.M., Zoetendal, E.G., en Ponsioen, C.Y. (2015) Fecal microbiota transplantation as novel therapy in gastroenterology: a systematic review. *World J Gastroenterol* 21: 5359-5371.

Sender, R., Fuchs, S., en Milo, R. (2016) Are We Really Vastly Outnumbered? Revisiting the Ratio of Bacterial to Host Cells in Humans. *Cell* 164: 337-340

Sharma, A. en Gilbert, J. A. (2018) Microbial exposure and human health. *Curr Opin Microbiol.* 44: 79-87.

Timmis, K.N., de Lorenzo, V, Verstraete, W. et al (2017) The contribution of microbial biotechnology to economic growth and employment creation. *Micro Biotech* 10: 1137-1144.

Timmis, K.N., De Vos, W.M., Ramos, J.L., et al (2017) The contribution of microbial biotechnology to sustainable development goals. *Micro Biotech* 10: 984-987

Trinh, P., Zaneveld, J. R., Safranek, S. en Rabinowitz, P. M. (2018) One Health relationships between human, animal, and environmental microbiomes: a mini-review. *Front Public Health.* 30: 6: 235, doi: 10.3389/fpubh.2018.00235

Trivedi, P., Schenk, P.M, Wallenstein, M.D en Singh, B.K. (2017) Tiny microbes, big yields: enhancing food crop production with biological solutions. *Micro Biotech* **10**: 999-1003.

United Nations (2015) Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development (<https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>)

Verstraete, W. en De Vrieze, J. (2017) Microbial biotechnology with major potentials for the urgent environmental needs of the next decades. *Micro Biotech* **10**: 988-994.

Wampach, A., Heintz-Buschart, J., Fritz, V., Ramiro-Garcia, J., Habier, J., et al (2018) Birth mode is associated with earliest strain-conferred gut microbiome functions and immunostimulatory potential. *Nature Com* **9**: 5091.

Wang, B., Yao, M., Lv, L., Ling, Z. en Li, L. (2017) The human microbiota in health and disease. *Engineering* **3**: 71-82

Watanabe, T. (1963) Infective heredity of multiple drug resistance in bacteria. *Bacteriol Rev* **27**:87-115

Watanabe, T. (1966) Infectious drug resistance in enteric bacteria. *N Engl J Med* **275**: 888-894.

Whipps, J.M., Lewis, K. en Cooke, R.C. (1988) Mycoparasitism and plant disease control 161-187. In: Burge, NM (editor), *Fungi in Biological Control Systems*. Manchester University Press; p176.

zur Hausen, H., Bund, T. en de Villiers, E. M. (2017) Infectious agents in bovine red meat and milk and their potential role in cancer and other chronic diseases. *Curr Top Microbiol Immunol* **407**: 83-116