



Biomimicry: “Leren van de natuur voor duurzame oplossingen”

Mauro Gallo

Biomimicry: “Leren van de natuur voor duurzame oplossingen”

Mauro Gallo

Colofon

Uitgever Aeres Hogeschool Wageningen
Vormgeving GAW ontwerp + communicatie, Wageningen
Cover illustratie Giulia Mauro
ISBN 978-90-78712-31-2

© 2018 Aeres Hogeschool Wageningen



Alle rechten zijn voorbehouden. Niets van deze pagina's mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotocopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, en evenmin in een retrieval systeem worden opgeslagen, zonder de voorafgaande schriftelijke toestemming van de rechthebbenden.

Inhoudsopgave

Voorwoord 4

1 Wat is biomimicry? 6

- 1.1 Natuur en mens 7
- 1.2 Definitie van biomimicry 8
- 1.3 Terminologie 11

2 Biologisch geïnspireerd ontwerp 16

- 2.1 Ontwerpfilosofie en levensprincipes 17
- 2.2 Algemene aspecten van bio-geïnspireerd ontwerp 18
 - 2.2.1 Oplossingsgericht ontwerp 21
 - 2.2.2 Probleemgericht ontwerp 23
- 2.3 Instrumenten ter ondersteuning van bio-geïnspireerd ontwerp 24
 - 2.3.1 Nodig een bioloog uit aan de ontwerptafel 24
 - 2.3.2 Doorzoeken van een databank 25
 - 2.3.3 Patronen uit de natuur 26
- 2.4 Onderwijs en de praktijk 28

3 Biomimicry als innovatie-instrument voor de agro-foodsector 30

- 3.1 Uitdagingen in agro-food 31
- 3.2 Bio-geïnspireerde robots in de landbouw 33
 - 3.2.1 Grippers 33
 - 3.2.2 Zelforganiserende zwerm robots 35
- 3.3 Bio-geïnspireerde waterfiltratie in de landbouw 36
 - 3.3.1 Levend filtratiesysteem 37
 - 3.3.2 Een biomimetisch vloeistof-gate-systeem 38

4 Biomimicry voor sociale innovatie 40

5 Onderzoekslijnen van het lectoraat Biomimicry 42

Dankbetuiging 44

Literatuur 45

Voorwoord

Sinds 2017 werken Aeres Hogeschool Wageningen, InHolland Delft en Van Hall Larenstein Leeuwarden samen in het lectoraat biomimicry dat is ingesteld door het Ministerie van Economische Zaken.

Biomimicry is een discipline die voor de oplossing van 'menselijke' problemen eerst kijkt hoe de natuur dat heeft opgelost. Het kernidee van biomimicry is dat talloze organismen al hebben 'uitgevonden' wat werkt, wat past en wat voortduurt, daarnaar te kijken en van te leren om nieuwe producten, processen en mogelijk manieren van samenleven en samenwerken te creëren voor de lange termijn.

Biomimicry wordt vooral verbonden aan technologische ontwikkelingen. Er zijn veel voorbeelden van producten en innovaties op basis van de biologie. Ingenieurs, architecten, ontwerpers maken gebruik van nieuwe kennis die we hebben opgedaan en opdoen door met moderne middelen de natuur te bestuderen. Mauro Gallo geeft hiervan voorbeelden en gaat daar verder onderzoek naar doen.

Van de natuur in haar geheel is meer te leren. In de praktijk van onderwijs, training, advies, consultancy en organisatieontwikkeling, wordt 'de natuur' vaak gebruikt als metafoor, als inspiratiebron of als voorbeeld voor allerlei processen zoals leiderschap, samenwerkingen, relaties, en de ontwikkeling van organisaties en de samenleving. Het gaat daarbij veelal over ecologische en veel minder vaak over biologische processen.

Langzaam heeft zich de vraag opgedrongen of we in de sociale omgeving meer kunnen leren uit de natuur dan wat we oppervlakkig 'zien' en vaak in metaforen vertaald wordt. Meer holistisch bezien gaat het hier over de systemische kant, de complexiteit, de context en de samenhang. Kunnen we bijvoorbeeld aantonen dat fundamentele ecologische principes zoals kringlopen (lerend, zelf organiserend, zelfregulerend en zelfvoorzienend vermogen), successie, diversiteit en veerkracht, sociaal en samenwerkend gedrag, *interconnectedness* en *interdependency* toepassen in organisaties leiden tot duurzaam organiseren?

In zijn lectoraat doet Mauro Gallo onderzoek naar de betekenis van technische innovaties in en voor de agro- en food sector, en naar de vraag of biomimicry onderbouwd kan worden zodat het bij kan dragen aan het sociaal wetenschappelijk domein. Tegelijkertijd is er een gerichte onderwijsvraag: is het logisch om vanuit ons groene DNA biomimicry-denken mee te nemen in ons onderwijs? Kun je biomimicry leren toepassen en kun je biomimicry toepassen in leren? (Hoe) kunnen we biomimicry toepassen in vmbo en mbo groen, in de lerarenopleiding meegeven aan

toekomstige leraren, en opnemen in de professionalisering voor zittende docenten. Is het denkbaar dat het integraal onderdeel van de curricula in het (groene) hbo wordt gericht op het zoeken naar duurzame oplossingen voor vraagstukken in de beroepspraktijk?

Zoals hierboven geschetst: genoeg praktijkvragen voor een lectoraat. Daarbij richt het zich echter niet alleen op het toepassen, maar nadrukkelijk op het wetenschappelijk onderbouwen van *bio-inspired* oplossingen en op het onderwijs. Mauro Gallo is op elk van de drie hogescholen aangesloten bij een onderzoeksgroep, en doet op elke hogeschool ànder onderzoek. Ook het samenbrengen van de mensen, de ervaringen en het samen kennis ontwikkelen en kennisdelen is een van de opdrachten van het lectoraat.

Madelon de Beus

Directeur Aeres Hogeschool Wageningen

1

Wat is biomimicry?

'Biomimicry' en 'biomimetica' zijn synoniemen en komen van het Oudgriekse *bios* (leven/natuur) en *mimesis* (imiteren). 'Biomimicry' en 'biomimetica' betekenen dus letterlijk 'imiteren van de natuur'. Ook de term 'bionica' beschouwen we als een synoniem van 'biomimicry', al is de oorsprong daarvan anders. 'Bionica' is een samenstelling van *bios* (leven/natuur) met het achtervoegsel '*ica*' (kunst). Jack E. Steel, arts en kolonel bij de Amerikaanse luchtmacht, gebruikte in de jaren '50 en '60 de term 'bionica' om systemen aan te duiden die een functie of eigenschap van een biologisch systeem nabootsen. De televisieserie *Bionic Woman* in de jaren '70 gaf de term 'bionica' ook de betekenis van 'biologisch + elektronica'. De letterlijke definitie van biomimicry, biomimetica en bionica geeft ons echter geen volledig inzicht in deze nieuwe opkomende discipline; ze geeft geen antwoord op het hoe, wat en waarom van imiteren van de natuur. Ik zal eerst het begrip 'natuur' en de relatie van de mens met de natuur wat inzichtelijker maken. Daarna geef ik een meer gedetailleerde definitie van biomimicry die deze vragen wél beantwoordt.

1.1 Natuur en de mens

Natuur omvat die klassen van levende wezens en systemen die ontstaan zonder ingrijpen van de mens. De milieubeweging, die zich richt op het beschermen van deze levende wezens en systemen, heeft zijn wortels in natuurbescherming en natuurbehoud. Bij natuurbescherming streeft men naar het behoud van natuurlijke hulpbronnen zoals hout, mineralen, bodem en water, zodat deze beschikbaar blijven voor toekomstige generaties. Deze conservationistische benadering wil vooral de huidige toestand handhaven waarin de ecosystemen productief zijn voor menselijke doeleinden. Zij kan daarom ook worden beschouwd als een antropocentrische benadering. Bij natuurbehoud streeft men ernaar ecosystemen ongestoord in hun oorspronkelijke staat te houden of ze daarin terug te brengen wanneer die ecosystemen door menselijk ingrijpen zijn gewijzigd (Mathews F. 2011). Deze preservationistische benadering kunnen we ook beschouwen als een biocentrische benadering: deze acht het levenssysteem net zo moreel relevant als de mens. Met andere woorden, de preservationisten of biocentrissen staan aan de kant van de natuur. De tegenstelling tussen antropocentrisme en biocentrisme vloeit voort uit de definitie van de natuur als een entiteit die contrasteert met de mensheid. Aan die definitie is het dualisme al inherent. De antropocentrische en de biocentrische benadering zijn echter geen van beide bevredigend. De antropocentrische benadering ziet de natuur als een hulpbron en negeert zo het feit dat levende wezens en systemen morele kwaliteiten met ons delen. Maar positie nemen aan de kant van de natuur, zoals biocentrissen dat doen, is

ook geen goede strategie. Deze houding gaat voorbij aan het feit dat de mensheid een prominente rol speelt in de strijd om de aarde. Om tweespalt te voorkomen hebben we een nieuwe visie op de natuur nodig: een visie die zowel het menselijke als het niet-menselijke omvat, zonder het onderscheid tussen beide te ontkennen. Deze nieuwe opvatting van de natuur is gebaseerd op een milieu-ethiek waarin de mens en zijn activiteiten en artefacten zich op hetzelfde morele niveau bevinden als de natuur. Insluiting van de mens in de natuur betekent niet dat men bijna volledig afhankelijk van de natuur in kleine gemeenschappen leeft met nauwelijks technologische ontwikkeling. Integendeel, opname van de mensheid in de natuur betekent dat de mens zich in zijn activiteiten en artefacten in potentie op dezelfde manier uitdrukt als de natuur dat doet. Dat betekent dat net zoals de natuur tot uiting komt in het handwerk van spinnen en bijen, de natuur ook tot uitdrukking komt in menselijke artefacten. Re-integratie van de mensheid in de natuur zal onze ontwerpfilosofie veranderen. De natuur en de daarmee samenhangende wetten worden in het ontwerpproces geïntegreerd. Daarvoor heeft de mensheid meer inzicht nodig in de wetten en functies die levende wezens en systemen beheersen, zodat ze die mee kan nemen in het ontwerp van nieuwe artefacten. Dit betekent dat de mens leert kijken naar de natuur als een mentor, dat wil zeggen als een entiteit waarvan hij kan leren.

1.2 Definitie van biomimicry

Bioloog en wetenschappelijk auteur Janine Benyus geeft een uitgebreidere definitie van biomimicry, waaraan zij de connotatie van 'duurzaamheid' heeft toegevoegd (Benyus 1997):

'Biomimicry is het leren en nabootsen van natuurlijke vormen, processen en ecosystemen om meer duurzame systemen te kunnen ontwerpen.'

Als we Benyus' definitie analyseren, kunnen we antwoord geven op het hoe, wat en waarom van imiteren van de natuur. De definitie die begint met 'Biomimicry is het leren van...' stelt waaraan onze interactie met de natuur moet voldoen en geeft daarom antwoord op de vraag: 'Hoe kunnen we de natuur imiteren?' Want, zoals gezegd in paragraaf 1.1, we kunnen de natuur imiteren en er ons door laten inspireren als we haar als mentor zien en niet als een verzameling middelen die we exploiteren voor de verwezenlijking van menselijke artefacten en activiteiten. De definitie geeft ook antwoord op de vraag: 'Wat kunnen we imiteren van de natuur?' We kunnen de natuur immers, zoals de definitie stelt, in al haar uitdrukkingen nabootsen: 'natuurlijke vormen, processen en ecosystemen'. Met een meer gedetailleerde beschrijving van de biologische niveaus die we kunnen nabootsten, geven we een betere ondersteuning aan het bio-geïnspireerd ontwerp. Vakili en Shu hebben de niveaus van de biologische organisatie die we kunnen gebruiken om biologische analogieën te vinden in kaart gebracht (Vakili and Shu 2001) (tabel 1).

Deze niveaus gaan van het moleculaire niveau (zoals DNA) tot het niveau van de biosfeer/het ecosysteem. Bovendien toont tabel 1 de mogelijke toepassingsgebieden voor elk biologisch imitatie-niveau.

De reden voor dit soort imitatie/inspiratie is 'duurzamer ontwerpen'. De diagrammen in figuur 1 laten kwantitatief zien in hoeverre natuurgeïnspireerd ontwerp duurzamere oplossingen voor menselijke/technische problemen kan genereren (Vincent, et al. 2006). Figuur 1a en 1b tonen de middelen (energie, informatie, materiaal, enzovoort), gerangschikt volgens grootte, die door de mens (figuur 1a) en door de natuur (figuur 1b) worden gebruikt om problemen op te lossen.

Bij groottes tot 1 m, waar de meeste technologie zich bevindt, is energieverbruik de belangrijkste variabele voor de oplossing van een probleem, op de voet gevolgd door een aanzienlijk gebruik van materiaal en ruimte (figuur 1a). Wij neigen ertoe de oplossing van een technisch probleem te zoeken in aanpassing van de hoeveelheid of het type materiaal, of door de energiebehoefte te veranderen (meestal te verhogen). In de biologie zijn informatie en ruimte echter de belangrijkste variabelen voor de oplossing van problemen op schaalgroottes zoals deze (figuur 1b).

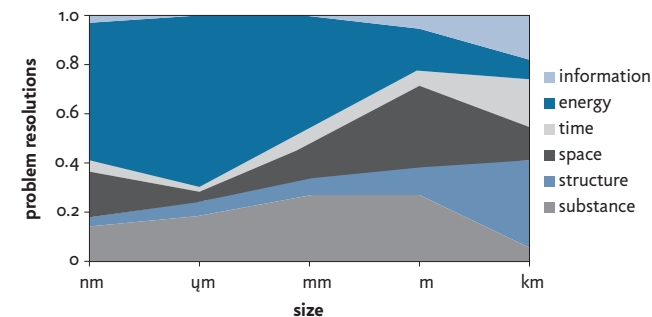


Fig. 1a

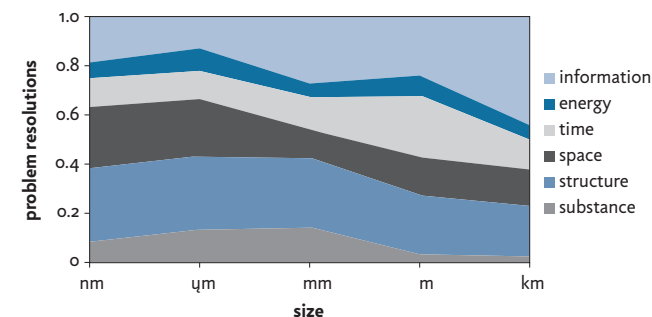


Fig. 1b

Figuur 1 – Probleemoplossingen gerangschikt volgens grootte (Vincent c.s., 2006): a) technische oplossingen; b) biologische oplossingen

Niveaus	Tussenniveaus	Mogelijke toepassingen
Molecuul		Chemisch, processen, katalyse, nanosystemen
Organel Een van de diverse gevormde lichamen met gespecialiseerde functies gesuspenseerd in het cytoplasma van eukaryotische cellen.	Eiwit	Componenten, systemen met enkelvoudige functies, microsystemen
Cel Het laagste organisatieniveau waarbij alle eigenschappen van het leven aan bod komen.	Virus	Microsystemen
Weefsel Een geïntegreerde groep cellen met een gemeenschappelijke structuur en functie.		Materialen, composieten, slimme materialen
Orgaan Een geheel van weefsels, binnen een organisme, met een of meerdere functies ten behoeve van dat organisme.		Systemen met enkelvoudige functies, subsystemen
Orgaansysteem Een geheel van organen dat een of meer lichamelijke functies vervult.		Multifunctionele systemen, informatiesystemen
Organisme Een volledig levend wezen bestaande uit een of meer cellen.		Autonome systemen, multifunctionele systemen
Populatie Een groep individuen van dezelfde soort die in een bepaald geografisch gebied leven.	Gezinseenheid	Zelforganiserende systemen
Gemeenschap Alle organismen die in een bepaald gebied leven; een verzameling populaties van verschillende soorten die dicht genoeg bij elkaar leven voor mogelijke interactie.	Gastheer-parasietrelatie	Concurrerende systemen, co-operatieve systemen
Ecosysteem Een niveau van ecologisch onderzoek dat alle organismen in een bepaald gebied omvat, samen met de abiotische factoren waarmee zij interageren; een gemeenschap en haar fysieke omgeving.	Bloom	Complexe systemen, macrosystemen
Biosfeer Het hele gebied op aarde dat wordt bewoond door leven. Alle ecosystemen op de wereld bij elkaar.		Macrosystemen, geïsoleerde systemen

Tabel 1 – Niveaus van biologische organisatie en mogelijke toepassingen (Vakili and Shu 2001)

1.3 Terminologie

Aangezien veel disciplines in het biologische en levenswetenschappelijke domein elkaar raken, is het hier wellicht nuttig om een aantal verwante, veelgebruikte termen te definiëren. Zo krijgen we inzicht in de positie van biomimicry en biologisch geïnspireerd ontwerp op dit grensvlak. En definiëren is natuurlijk ook nuttig omdat voor biologisch geïnspireerd ontwerp veel verschillende termen worden gebruikt.

Biotechniek, biologische techniek, biotechnische manipulatie: de toepassing van technische principes en instrumenten, bijvoorbeeld natuurkunde, wiskunde, analyse en synthese, om problemen op het gebied van de levenswetenschappen op te lossen, en eventueel biologische en technische systemen te integreren.

Biomechanica: toepassing van mechanische principes voor de bestudering en modellering van de structuur en functie van biologische systemen.

Biomedische technologie: toepassing van technische principes en technieken op medisch gebied, bijvoorbeeld het ontwerp en de vervaardiging van medische hulpmiddelen, kunstmatige organen, ledematen, enzovoort.

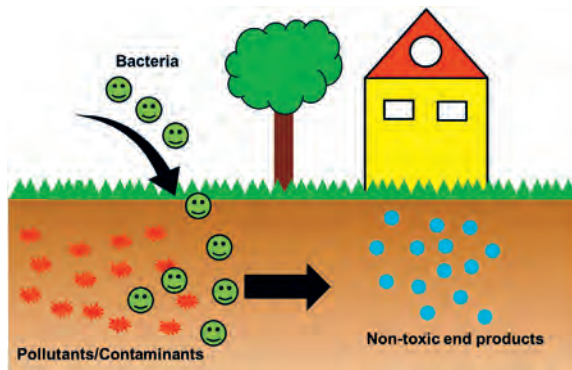
Biofysica: term die wordt gebruikt door Otto Schmitt (Schmitt 1969) voor zowel de toepassing van de natuurwetenschappen om problemen in de biologische wetenschappen op te lossen, als de aanpak van problemen in de natuurwetenschappen/techniek door biologen.

Biomimetica: studie naar de vorming, structuur of functie van biologisch geproduceerde stoffen en materialen (zoals enzymen of zijde) en biologische mechanismen en processen (zoals eiwitsynthese of fotosynthese), vooral met het oog op de synthese van soortgelijke producten met behulp van kunstmatige mechanismen die natuurlijke mechanismen imiteren (Schmitt 1969).

Biomimese, biomimicry, biognosis, bio-inspiratie, biomimetisch ontwerp, bioanaloog ontwerp, biologisch geïnspireerd ontwerp: synoniem voor biomimetica: het imiteren van natuurlijke modellen, systemen en processen om menselijke problemen op te lossen.

Interessant is dat er, met uitzondering van de bidirectionele term biofysica, twee belangrijke richtingen zijn in het grensvlak tussen biologie en techniek. De eerste wil technische principes toepassen bij de oplossing van problemen in de levenswetenschappen, en omvat termen als biotechniek, biomedische technologie en biomechanica. De tweede beoogt de toepassing van de principes van biologische systemen om technische problemen op te lossen (Shu, et al. 2011).

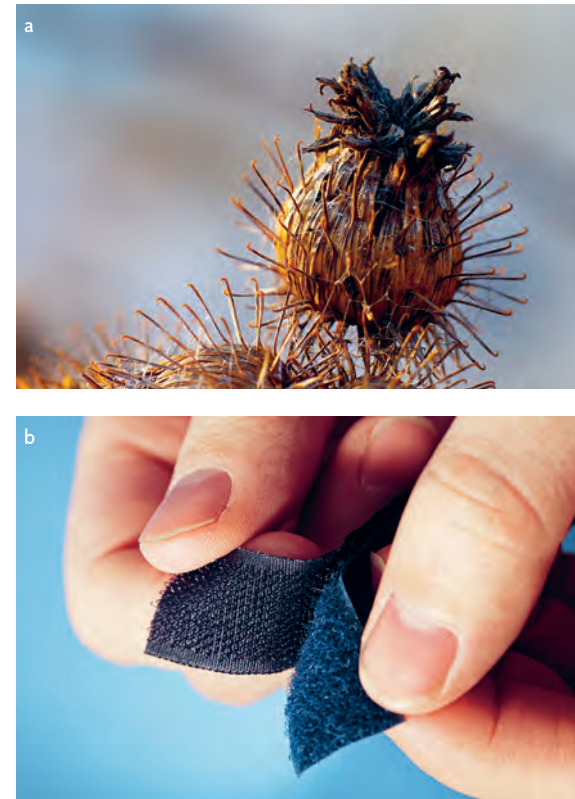
Gewoonlijk wordt biomimicry ten onrechte in verband gebracht met biotechnologie, dat wil zeggen het gebruik van levende systemen en micro-organismen om producten of processen te ontwikkelen, te maken of te wijzigen. Het volgende voorbeeld illustreert effectief het verschil tussen deze twee disciplines (figuur 2). Een stuk grond is vervuild met verontreinigende stoffen uit de industrie. De onderzoekers weten dat een bepaalde familie bacteriën, als die over het gebied wordt verspreid, deze verontreinigende stoffen kan opnemen en in hun werking vertragen, en daarmee onschadelijk maken voor het milieu. Deze bacteriekolonies kunnen we dus gebruiken om de oorspronkelijke omgevingscondities te herstellen die veranderingen ondergingen door producten van industriële activiteit. Deze saneringsstrategie classificeren we niet als een toepassing van biomimicry omdat de mens in deze context levende systemen of micro-organismen uit de natuur gebruikt om een probleem op te lossen. Het belangrijkste kenmerk van biomimicry, nabootsing van de natuur, ontbreekt dus.



Figuur 2 – Voorbeeld van een biotechnische toepassing

Velcro

De merknaam Velcro voor klittenband is een samentrekking van de Franse woorden *velours* (fluweel) en *crochet* (haakje). In het begin van de jaren '40 viel het de Zwitserse ingenieur George de Mestral op dat de vrucht van de late stekelnoot (*Xanthium strumarium*) in de vacht van honden bleef hangen. Hij onderzocht deze vrucht onder een microscoop (figuur 3a). Hij ontdekte dat de ellipsvormige vrucht met een lengte van 1 cm dicht opeengepakte haakvormige uitsteeksels heeft. Deze blijven in de kleren van mensen en de vacht van dieren zitten, waardoor de zaden op grote schaal verspreid kunnen worden. Geïnspireerd door deze stekelnoot gebruikte De Mestral nylon om klittenbandsluitingen te maken (figuur 3b). Om de kleefkracht te verbeteren bestaat klittenband uit een strook met ronde lussen en een strook met haakjes. Klittenband heeft een uitzonderlijke kleefkracht op een klein oppervlak en wordt veel gebruikt als eenvoudig en praktisch vervangingsmiddel voor knopen of haken in kleding en schoenen (Hwang, et al. 2015).



Figuur 3 – Voorbeeld van bio-geïnspireerd ontwerp op vormniveau:
a) vrucht van de late stekelnoot (*Xanthium strumarium*); b) klittenbandsluiting

WhalePower

WhalePower ontwierp een nieuw rotorblad voor ventilatoren en windturbines met behulp van de tuberkeltechnologie. Het viel Frank E. Fish op dat de voorste randen van de vinnen van bultrugwalvissen bobbels of tuberkels hebben (figuur 4a). Omdat dit verschijnsel niet paste binnen de huidige denkwijzes ontging hem het nut ervan. Door middel van windtunneltesten ontdekte Fish dat de tuberkels op de vinnen de overtrekhoek met ongeveer 40 procent vertragen, terwijl de draagkracht toeneemt en de weerstand afneemt. De huidige windturbinebladen hebben een gelijkmatige, hoge wind nodig om elektriciteit op te wekken. De efficiëntie van de elektrische ventilator hangt af van de hoeveelheid energie die hij nodig heeft om lucht te verplaatsen. Bladen ontworpen met behulp van de tuberkeltechnologie (figuur 4b) zijn energiezuiniger. Het windturbineblad werkt bij lagere windsnelheden, zodat er gedurende langere tijd en op meer locaties actief elektriciteit kan worden opgewekt (Baumeister, et al. 2011).



Figuur 4 – Voorbeeld van bio-geïnspireerd ontwerp op vormniveau:

a) tuberkels of bobbels op de voorste randen van walvisvinnen;

b) blad ontworpen met behulp van tuberkeltechnologie (whalepowercorp.wordpress.com/wind-turbines)

Calera

Om conventioneel cement te kunnen maken, delft de industrie kalksteen, verhit dat tot 1450°C en verpulvert de zo verkregen cementklinker. Dit energie-intensieve proces gebruikt fossiele brandstoffen en stoot CO_2 uit, dat eerder op een geologische tijdschaal werd vastgehouden. De Calera Corporation ontwikkelde een alternatief biomimetisch proces voor de productie van cement waarbij de creatie van kalksteen-afzettingen wordt nagebootst. Het begint met de biologische fase: koraal maakt door kristalvorming in verzadigd zout water aragoniet, een polymorf van CaCO_3 . Bij de kristalvorming fungeert een klein kristal van CaCO_3 als 'zaad' waaruit de andere kristallen zich vormen. De tweede fase is geochemisch: koraal van aragoniet dat wordt blootgesteld aan zoet water is onstabiel en wordt spontaan omgezet in calciet, een andere, maar stabiele polymorf van CaCO_3 . Calera produceert aragoniet uit kooldioxide in verzadigd pekkel. Door oververzadigde pekkel door rookgassen te spuiten, wordt het gasvormig CO_2 omgezet in koolzuur en bicarbonaationen.

Vervolgens wordt de pH verhoogd om aragoniet uit de oplossing te laten neerslaan, waarna die wordt gedroogd met behulp van de restwarmte van de rookgassen. Wanneer deze aragoniet tijdens de productie van beton met zoet water wordt gemengd, verandert het in het stabielere calciet en verhardt (Baumeister, et al. 2011). Het door Calera ontwikkelde proces legt CO_2 vast in plaats van het uit te stoten, zodat dit proces niet alleen koolstofneutraal is, maar zelfs koolstofnegatief (figuur 5).



Figuur 5 – Voorbeeld van bio-geïnspireerd ontwerp op procesniveau: productie van cement bij Calera

Industriële symbiose in Kalundborg

Symbiose is een samenlevingsverband tussen organismen van verschillende soorten waarbij sprake is van een wederzijds voordelige relatie. In het oude havenstadje Kalundborg in Denemarken nemen diverse verwerkingsbedrijven, een afvalverwerkingsbedrijf en de gemeente Kalundborg deel aan een vorm van industriële symbiose. Alle deelnemers exploiteren elkaars reststoffen of bijproducten. De symbiose is een zelforganiserende samenwerking die een aantal decennia bestaat en vandaag de dag zo'n twintig projecten telt (Baumeister, et al. 2011).



2

Biologisch geïnspireerd ontwerp

Het vorige hoofdstuk liet enkele inspirerende voorbeelden van biomimicry zien. De meeste daarvan werden verwezenlijkt zonder systematisch ontwerp. Ze zijn verkregen door serendipiteit of door zeer lange en frustrerende proefondervindelijke processen. Aangezien biomimicry een nieuwe opkomende discipline is, is de ontwikkeling van een systematische benadering van bio-geïnspireerd ontwerp nog steeds een levendig en dynamisch onderzoeksgebied. Aanvankelijk wekte biomimicry vooral de interesse van ontwerpers en ingenieurs die, door onderzoek van de natuur, creatievere en efficiëntere oplossingen voor hun uitdagingen hopen te ontdekken. Daarom ontwikkelden de ontwerpprocessen en -methodologieën zich voornamelijk op het gebied van technologie. Interdisciplinair gezien vormen abstractie en functionele modellering de belangrijkste kenmerken van bio-geïnspireerd ontwerp. Bovendien zijn deze aspecten niet afhankelijk van de specifieke disciplines, zodat de in de volgende paragrafen beschreven methodieken en processen ook kunnen worden toegepast om problemen op een divers gebied als de sociale wetenschappen op te lossen.

De volgende paragraaf bespreekt de filosofie die ten grondslag ligt aan bio-geïnspireerd ontwerp. Vervolgens belichten we het huidige kader voor bio-geïnspireerd ontwerp en de bijbehorende ondersteunende instrumenten. Dit hoofdstuk sluiten we af met een bespreking van de aanpak waarop we biomimicry willen leren, onderwijzen en in de praktijk willen brengen.

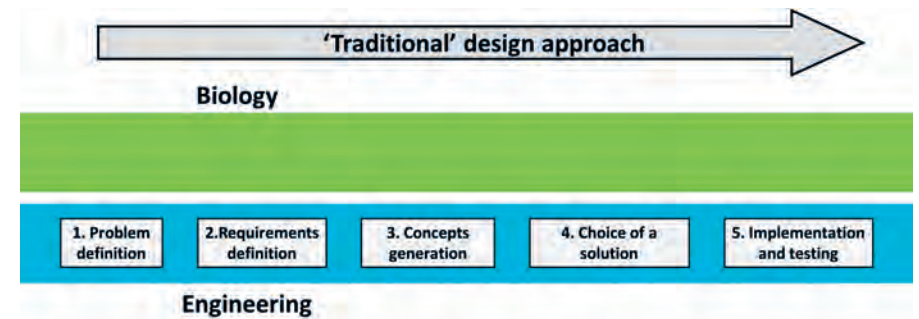
2.1 Ontwerpfilosofie en levensprincipes

De filosofie die ten grondslag ligt aan biomimicry-ontwerp komt van denkers als de bioloog Janine Benyus en de economen Amory en Hunter Lovins. Volgens Benyus zijn in de ontwerpen van de natuur negen principes te onderscheiden. De natuur, zo betoogt Benyus, (i) werkt op zonlicht, (ii) gebruikt alleen de energie die het nodig heeft, (iii) past vorm aan functie aan, (iv) recyclet alles, (v) beloont samenwerking, (vi) zet in op diversiteit, (vii) vereist lokale expertise, (viii) beperkt excessen van binnenuit, en (ix) maakt gebruik van de kracht van begrenzing (Benyus 1997). Als we onze industrie en onze bebouwde omgeving volgens deze principes zouden inrichten, zo stelt Benyus, zouden we weldra binnen de ecologische grenzen van de natuur leven en zo ons doel van duurzaamheid bereiken. Gezien het beschrijvende karakter van de levensprincipes vormen ze voor ontwerpers een soort richtlijn voor bio-geïnspireerd ontwerp. Uitgangspunten uit het leven, zoals 'zet in op diversiteit' of 'de natuur werkt op zonlicht', bepalen de modus operandi van de ontwerper, maar maken de natuur voor ons niet begrijpelijker. Pas als we begrijpen waarom de natuur op zonlicht werkt

en waarom zij inzet op diversiteit, kunnen we ons de mentaliteit van de natuur eigen maken en vanuit deze mentaliteit onze wereld vormgeven op een niet-dualistische wijze. Mathews onderscheidt twee belangrijke principes die ten grondslag liggen aan biomimetisch ontwerp (Mathews F. 2011). De eerste wordt gedefinieerd als autopoiese of conativiteit en verwijst naar het vermogen van een natuurlijk organisme om zich voort te planten en te handhaven. Het streven naar behoud van de eigen integriteit en het eigen bestaan is het kenmerk van alle levende wezens. Er is echter nog een ander kenmerk van levende systemen. Het betreft de zeer bijzondere manier waarop zij hun conatieve doelen nastreven. Zij doen dit op een manier die hen de minste inspanning kost. Mathews stelt voor dit het principe van de minste weerstand te noemen. Telkens wanneer organismen weerstand ondervinden, zijn ze geneigd om, als de omstandigheden het toelaten, zich terug te trekken en obstakels te vermijden in plaats van ze rechtstreeks aan te pakken. Het pad van de minste weerstand is dus een pad waarmee men zijn eigen conativiteit tracht te vervullen en tegelijkertijd, voor zover mogelijk, aan de conativiteit van anderen tracht tegemoet te komen. Als levende systemen zijn wij mensen in wezen ook conatieve wezens: onze fundamentele impuls is te streven naar het behoud van de integriteit van ons eigen bestaan en onszelf in leven te houden. In dit opzicht zijn we in wezen 'onderdeel van de natuur'. Maar omdat we begiftigd zijn met een reflexief bewustzijn, kunnen we nadenken over onze eigen aard en die, door erover na te denken, aanpassen. Bovendien kunnen we, ondanks onze behoefte aan onmiddellijke bevrediging, ervoor kiezen om af te wijken van het principe van de minste weerstand en in plaats daarvan te handelen in een voorschrijven-beheersmodus, die ons in feite 'buiten de natuur' plaatst. De wetenschap heeft ons technologieën gegeven waarmee we toegang hebben gekregen tot onbeperkte hoeveelheden energie in de vorm van elektriciteit, kernenergie, thermische energie, enzovoort. Aangezien deze energie wordt opgewekt door exploitatie van externe (natuurlijke) energiebronnen en niet afkomstig is van onze eigen levenskracht, zien we dit niet als een vorm van zelfvernietiging. Dit geeft ons de schijnbare vrijheid om het milieu straffeloos uit te buiten. Zonder ons er volledig van bewust te zijn, tasten we het milieu waarin we leven aan en op de lange termijn zal dit soort gedrag ernstige gevolgen hebben voor ons leven op aarde.

2.2 Algemene aspecten van biogeïnspireerd design

Meestal beginnen ontwerpactiviteiten met de noodzaak om een probleem op te lossen. Inderdaad, de eerste stap van het 'traditionele' ontwerpproces, afgebeeld in figuur 6, is een probleemstelling. Deze stap wordt gevolgd door het vaststellen van de eisen waaraan het apparaat moet voldoen, waarna het creatieve deel van het ontwerpproces begint: de conceptgeneratie. In het 'traditionele' ontwerpproces worden de concepten gegenereerd binnen het vakgebied van de ontwerper (monodisciplinaire benadering). De ontwerper selecteert het meest veelbelovende concept op basis van vooraf gedefiniëerde criteria, waarna de activiteiten met betrekking tot testen en implementatie volgen.



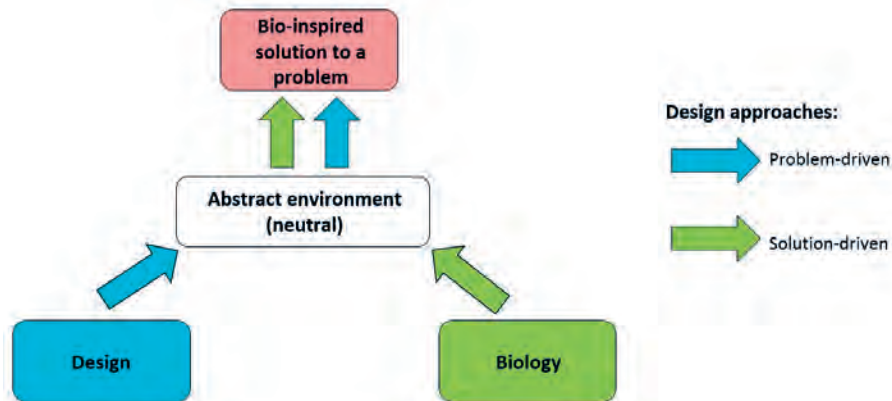
Figuur 6 – De belangrijkste stappen in het 'traditionele' ontwerpproces

Het belangrijkste verschil tussen 'traditioneel' en bio-geïnspireerd ontwerp is het creatieve deel van het ontwerpproces: de conceptgeneratie. In de 'traditionele' ontwerpbenadering gebruikt de ontwerper zijn ervaring en specifieke kennis om concepten te genereren. In de bio-geïnspireerde benadering worden concepten gegenereerd in het biologische domein: een discipline die ontwerpers, die doorgaans een achtergrond hebben in technisch en/of industrieel ontwerp, niet eigen is. Bij bio-geïnspireerd ontwerp zoekt de ontwerper naar oplossingen voor het probleem door verder te gaan dan zijn vakgebied en over de grens van het biologische domein te stappen. De ontwerper betreedt het biologische domein en identificeert de biologische systemen die kunnen worden nagebootst om de concepten te genereren. Net als bij de 'traditionele' benadering vindt een evaluatie van de concepten plaats op basis van vooraf gedefiniëerde criteria, waarna het uiteindelijke concept wordt gekozen. Het tot nu toe beschreven bio-geïnspireerde ontwerpproces definiëren we als een probleemgerichte benadering, waarbij een gegeven probleem de motivatie vormt om te zoeken naar biologische analogieën die de probleemoplossing kunnen ondersteunen. Naast de probleemoplossende benadering kent bio-geïnspireerd ontwerp ook een andere holistische ontwerpbenadering, namelijk de oplossingsgerichte benadering: een interessant biologisch fenomeen inspireert tot het zoeken naar mogelijke toepassingen.

Of men nu voor een probleemgerichte of oplossingsgerichte holistische benadering kiest, de grootste uitdaging in het bio-geïnspireerde ontwerpproces is toegang te krijgen tot het biologische domein. Tot nu toe ontwikkelde de wetenschap zich met een zeer reductionistische benadering. Ingenieurs, ontwerpers, architecten, planners, sociale wetenschappers, scheikundigen, materiaalwetenschappers, biologen, enzovoort, worden monodisciplinair opgeleid. Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van een andere mentaliteit en ander wetenschappelijk jargon, die communicatie en kennisdeling tussen verschillende domeinen onmogelijk maken. Biologie is grotendeels beschrijvend en creëert classificaties, terwijl techniek het resultaat is van besluitvorming: zij is prescriptief en genereert regels en regelmatigheden. Om een voorbeeld te noemen wat betreft de wetenschappelijke taal: voor Engelstalige biologen staat *stress*

voor extreme omstandigheden, zoals hitte, watergebrek of de aanwezigheid van roofdieren waarop organismen reageren met fysiologische, gedragsmatige, genetische of ontwikkelingsmechanismen (of nog andere mechanismen). Voor Engelstalige werktuigbouwkundigen is *stress* de maat voor de kracht per oppervlakte-eenheid op een vervormbaar lichaam. Dergelijke verschillen doen zich zelfs voor binnen het brede gebied van de techniek, en worden steeds belangrijker naarmate er meer disciplines bij betrokken zijn (Yen, et al. 2014).

Instrumenten die ontwerpers en biologen kunnen gebruiken om verbanden en parallellen te leggen tussen biologische en geconstrueerde systemen zijn functionele modellering en abstractie. Met abstracties kunnen we de essentie van een product, proces of component, en ook van een biologisch systeem, in een beknopte zin, diagram of beeld, of in domeinonafhankelijke termen vastleggen (Nagel, et al. 2010). Functionele modellering door ontwerpers en biologen maakt de overdracht van biologische systemen en technische uitdagingen binnen een 'neutrale en abstracte omgeving' mogelijk (figuur 7). De technische uitdagingen en biologische systemen worden uitgedrukt in hun ware vorm zonder enig wetenschappelijk jargon. Deze 'neutrale en abstracte omgeving' is dan ook de plek waar het mogelijk is om analogieën en metaforen te scheppen die tot creatieve sprongen voorwaarts kunnen leiden.



Figuur 7 – Schema van probleem- en oplossingsgerichte ontwerpen

Om de sleutelrol van functionele modellering voor bio-geïnspireerd ontwerp te benadrukken, beschrijven we hieronder twee voorbeelden met betrekking tot de oplossings- en probleemgerichte ontwerpen.

Voorbeeld a): het oplossingsgerichte ontwerp

Kijk eens naar een blad als een interessant biologisch systeem dat mogelijk kan leiden tot een oplossing in het technische domein. Definitie: *een blad is een orgaan van een*

vasculaire plant en is het belangrijkste laterale aanhangsel van de stengel. Het blad en de stengel vormen samen de scheut. Hoewel er bladeren zijn in allerlei vormen, maten en texturen, is een blad meestal een dun, dorsoventraal afgeplat, bovengronds orgaan dat zorgdraagt voor de fotosynthese (Wikipedia 2018). De beschrijvende definitie van de bioloog wekt niet de interesse van de ontwerper, omdat in de definitie, die voor een niet-bioloog nauwelijks te begrijpen is, niet expliciet wordt aangegeven welke functies kunnen inspireren tot een oplossing van een technisch probleem. De hoofdfunctie van het blad wordt in de definitie uitgedrukt door het woord *fotosynthese*: het proces waarmee planten en andere organismen lichtenergie omzetten in chemische energie. Een synthetische functionele definitie van een blad zou daarom kunnen zijn: *energieomzettingssysteem (lichtenergie → chemische energie)*. Een dergelijke functionele definitie maakt het mogelijk het biologische systeem (blad) van het biologische domein naar de abstracte omgeving over te brengen (figuur 7). Dat wekt de interesse van de ontwerper, die het blad zal beschouwen als een mogelijke biologische oplossing voor technische problemen bij energieomzettingssystemen.

Voorbeeld b): het probleemgerichte ontwerp

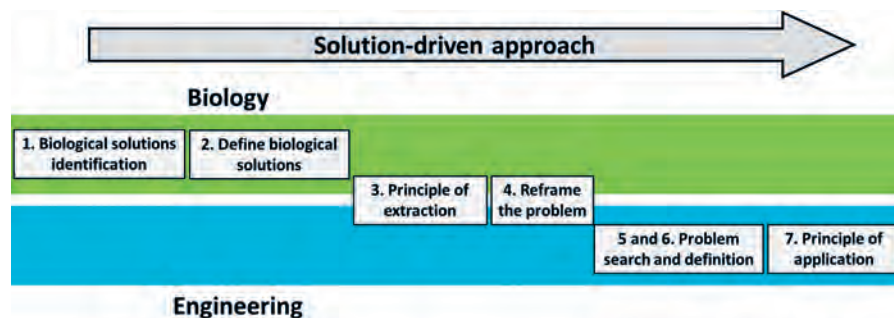
Stel je voor dat een team van technici/ontwerpers de volgende technische uitdaging aangaat: *het ontwerp van een nieuwe recuperator voor een stoom- en gascentrale*. De uitdaging die in deze bewoordingen wordt geformuleerd is voor de bioloog niet te begrijpen. De term 'recuperator', waarmee het te upgraden onderdeel wordt aangeduid, is voor een expert in energieomzettingssystemen een bekend begrip, maar kan een misleidende term zijn voor een bioloog. Die vraagt zich misschien af: wat moeten we recupereren? Water, materiaal, energie? Om deze vraag te beantwoorden, kunnen de ontwerpers de uitdaging beter formuleren in voor de bioloog begrijpelijke termen. Daarom kunnen de ontwerpers de recuperator in functionele termen omschrijven als: *een apparaat waarin warmteoverdracht plaatsvindt tussen een warme vloeistof en een koude vloeistof*. Een dergelijke beschrijving maakt het mogelijk de technische uitdaging over te zetten naar de abstracte omgeving (figuur 7). De bioloog begrijpt zo de hoofdfunctie (warmteoverdracht) en is vervolgens in staat de strategieën te identificeren die organismen in het biologische domein gebruiken om deze functie te vervullen.

2.2.1 Oplossingsgericht ontwerp

Op basis van observatie van de ontwerpprocessen van studenten, hebben Helms, Vattam en Goel de belangrijkste stappen in het oplossingsgerichte ontwerp geëxtrapoleerd (Helms, Vattam and Goel 2009). Het ontwerpproces wordt op gang gebracht doordat een biologisch systeem de nieuwsgierigheid en interesse van de studenten wekt.

1. *Identificatie van de biologische oplossing*: Ontwerpers nemen een interessant biologisch fenomeen als uitgangspunt.

2. *Definitie van de biologische oplossing:* In deze stap laten ontwerpers structuren en oppervlakkige mechanismen achter zich en vormen zij zich een dieper begrip van het biologische systeem. Als bijvoorbeeld een abaloneschelp wordt gekozen als inspirerend biologisch systeem, moeten de studenten de stap zetten van gemakkelijk detecteerbare functies/eigenschappen als hard, licht en slag- en stootvast naar inzicht in de complexe interacties van composietmaterialen die verantwoordelijk zijn voor dit gedrag. De functionele ontleding die zo kenmerkend is voor de definitie van technische problemen kan ook helpen om de biologische oplossing te begrijpen.
3. *Extractie van principes:* Zodra het biologische fenomeen voldoende is begrepen, worden de principes in een oplossingsneutrale vorm geëxtraheerd. Dat houdt in dat verwijzingen naar structurele en milieuelementen in het biologische domein er uit worden gehaald. Bijvoorbeeld in plaats van de abaloneschelp te omschrijven als 'interactie tussen flexibele eiwitten en zeshoekige calciumcarbonaatafzettingen', wordt het principe uitgedrukt als 'hechte vorming van composietmaterialen door afwisselend flexibele en stijve structuren die slag- en stootvast zijn'.
4. *Herkaderen van de oplossing:* Bij het herkaderen van de oplossing wordt bekeken welk nut de door het biologische verschijnsel tot stand gebrachte functie voor de mens zou kunnen hebben.
5. *Probleemzoekactie:* Na het herkaderen van het biologische fenomeen in termen van menselijk nut, volgt identificatie van de menselijke problemen waarop het principe kan worden toegepast.
6. *Definitie van het probleem:* Een geïdentificeerd probleem wordt met instrumenten als functionele ontleding en optimalisatie gedefinieerd.
7. *Toepassing van principes:* Het biologische principe wordt vertaald naar het technische domein door het introduceren van nieuwe restricties (en affordanties),



Figuur 8 – Stappen in het oplossingsgerichte ontwerp

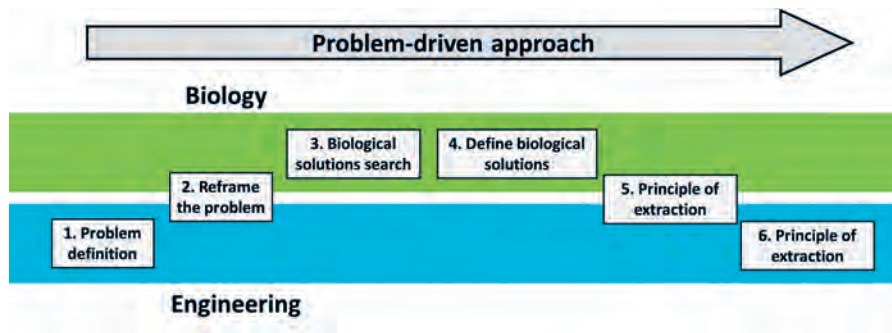
zoals gewicht, flexibiliteit, impactweerstand en productieprocescriteria. Vervolgens wordt het principe toegepast om een oplossing te ontwikkelen voor het geïdentificeerde probleem.

Figuur 8 toont de belangrijkste stappen in de oplossingsgerichte benadering van bio-geïnspireerd ontwerp. Om een bio-geïnspireerde oplossing voor een technisch probleem te vinden en/of een innovatieve manier om een technische taak uit te voeren, hoeft men tijdens het ontwerpproces slechts eenmaal de grens tussen het technische domein en het biologische domein over te steken.

2.2.2 Probleemgericht ontwerp

Hieronder leggen we de belangrijkste stappen in de probleemgerichte benadering uit (Helms, Vattam and Goel 2009). De beschrijving van sommige stappen als '*definitie van de biologische oplossing*', '*extractie van principes*' en '*toepassing van principes*' blijven achterwege omdat deze stappen hier identiek zijn aan die welke zijn beschreven in 2.2.1.

1. *Definitie van het probleem:* Ontwerpers beginnen met het definiëren van een probleem dat ze willen oplossen. Het probleem kan bijvoorbeeld zijn: een surfplank die haaienaanvallen kan voorkomen.
2. *Herkaderen van het probleem:* Ontwerpers hebben problemen in eerste instantie altijd gedefinieerd in menselijke termen, zoals politieagenten beschermen of haaienaanvallen vermijden. Om oplossingsanalogieën in de biologie te vinden, herdefinieerden ontwerpers hun problemen in breder toepasbare biologische termen, vaak in de vorm van een vraag als 'Hoe vervullen biologische oplossingen de xyz-functie?' Deze stap wordt het 'biologiseren' van het probleem genoemd. De gebiologiseerde versie van de functie 'een kogel stoppen' wordt dan bijvoorbeeld 'Welke eigenschappen hebben organismen om schade te voorkomen, te weerstaan en te genezen?'
3. *Zoekactie naar biologische oplossing:* De ontwerper zoekt in het biologische domein naar mogelijke biologische systemen waarvan de functies kunnen worden overgenomen die in potentie een oplossing vormen voor het probleem. In de volgende paragraaf beschrijven we enkele hulpmiddelen ter ondersteuning van biomimetisch ontwerp.
4. *Definitie van de biologische oplossing*
5. *Extractie van principes*
6. *Toepassing van principes*



Figuur 9 – Stappen in het probleemgerichte ontwerp

Figuur 9 toont de belangrijkste stappen in de probleemgerichte benadering van bio-geïnspireerd ontwerp. Om een bio-geïnspireerde oplossing voor een technisch probleem te vinden is het nodig tijdens het ontwerpproces twee keer de grens tussen het technische domein en het biologische domein over te steken.

Het is van belang om hier te benadrukken dat in de praktijk zowel de oplossingsgerichte als de probleemgerichte benadering niet-lineair en dynamisch is, in die zin dat de output van latere stadia vaak van invloed is op eerdere stadia. Dat zorgt voor iteratieve feedback en verifiëronderzoek.

2.3 Instrumenten ter ondersteuning van bio-geïnspireerd ontwerp

Het vereist meta-denken om verbanden tussen het biologische domein en andere disciplines te leggen. Er zijn inderdaad nieuwe manieren van denken en redeneren nodig om over de grenzen van verschillende domeinen heen te stappen. Visueel denken (het vermogen om in beelden te denken), analoog denken (het vermogen om informatie uit het ene domein te gebruiken om problemen in het andere domein op te lossen) en een gemeenschappelijke taal spreken zijn belangrijke vaardigheden die ontwerpers moeten ontwikkelen om analogieën te kunnen vinden tussen het biologische domein en andere disciplines. De volgende paragrafen beschrijven enkele praktijkgerichte strategieën die het gemakkelijker maken biologische oplossingen te vinden.

2.3.1 Nodig een bioloog uit aan de ontwerptafel

Een voor de hand liggende manier om mogelijke biologische analogieën te vinden voor het oplossen van problemen die met een ander domein te maken hebben, is om een bioloog daarnaar te vragen. Het voordeel daarvan is dat de ontwerper, meestal zonder of

met zeer beperkte biologische kennis, niet op zoek hoeft te gaan naar mogelijke biologische oplossingen, met het risico dat hij de biologische informatie verkeerd interpreteert. Het nadeel van deze benadering is dat ontwerpers niet altijd biologen kennen die hierin mee kunnen denken. Om dit probleem op te lossen biedt de website AskNature.org de mogelijkheid om een team van biologen te raadplegen. Een ander groot nadeel van deze benadering is dat de door de biologen aangedragen oplossingen weinig objectief zullen zijn, omdat ze gericht zijn op het specifieke vakgebied van de bioloog.

2.3.2 Doorzoeken van een databank

Een objectievere manier om de benodigde biologische informatie voor de oplossing van een probleem vast te leggen, is het gebruik van een databank (Shu, et al. 2011). Binnen de databank worden de biologische systemen geïnclassificeerd aan de hand van trefwoorden die ook worden gebruikt om technische oplossingen uit het verleden te categoriseren. De relevantie van de gevonden informatie is daardoor gewaarborgd, omdat dezelfde trefwoorden worden gebruikt voor de classificatie van de biologische systemen en om toegang te krijgen tot de databank. Trefwoorden zijn meestal werkwoorden waarmee de belangrijkste functies van de biologische systemen worden vastgelegd. Het grootste nadeel van het doorzoeken van een databank die specifiek is ontwikkeld ter ondersteuning van biomimetisch ontwerp is dat de zoekresultaten beperkt zijn tot wat er in de databank is ingevoerd. Afhankelijk van de structuur van de databank kan er bij de categorisering van de ingevoerde informatie sprake zijn van vertekening. Een eenvoudig voorbeeld: dient, aangezien de klittenbandsluiting is ontwikkeld op basis van de klitten van de late stekelnoot, de biologische entiteit van de stekelnoot gecategoriseerd te worden onder de technische functie van sluiting? In dat geval kunnen andere potentiële functies of strategieën die op basis van de stekelnoot kunnen worden geëxtraheerd, verloren gaan. Naast de databank om biologische systemen voor technisch gebruik te verzamelen, is de enorme hoeveelheid biologische informatie die al beschikbaar is in de vorm van artikelen, teksten en boeken een andere waardevolle bron voor het bouwen van een databank. Deze benadering, ook wel op natuurlijke taal gebaseerd zoeken genoemd, vermijdt het enorm vele en subjectieve werk dat nodig is om de biologische fenomenen in een databank te classificeren. De eerste bron van een op natuurlijke taal gebaseerde databank is cruciaal. Deze bron moet: a) geschreven zijn in een taal die gemakkelijk te begrijpen is voor ontwerpers zonder of met een zeer beperkte biologische achtergrond; b) een overzicht geven van alle biologische systemen, van micro-organismen tot ecosystemen. Een aldus opgezette databank kan een waardevol instrument zijn om de meer relevante biologische fenomenen te identificeren. Indien nadere gegevens nodig zijn, kunnen deze worden gevonden in meer geavanceerde biologische literatuur. Het zoeken naar geavanceerdere bronnen zal echter in eerste instantie resultaten opleveren die technischer en dus moeilijker te begrijpen zijn. Dit is dan frustrerend voor de ontwerper en deze resultaten zal hij eerder over het hoofd zien, zelfs als ze relevant zijn. Het vinden van relevante analogieën in een op natuurlijke taal gebaseerde databank hangt af van de woordkeuzes van de auteurs van de verschillende bronnen, aangezien

meerdere termen hetzelfde concept kunnen beschrijven en lokaliseren. Net als voor de databanken voor technisch gebruik, verdienen werkwoorden in de op natuurlijke taal gebaseerde databanken de voorkeur als trefwoord. Dit omdat het gebruik van zelfstandig naamwoorden de verscheidenheid aan mogelijke biologische oplossingen beperkt. Als we bijvoorbeeld met het werkwoord 'beschermen' zoeken, worden verschillende biologische fenomenen geïdentificeerd die te maken hebben met bescherming. Zoeken we echter met het zelfstandig naamwoord 'nagelriemen' als trefwoord, dan vinden we alleen informatie met betrekking tot nagelriemen, waardoor we andere mogelijke oplossingen voor bescherming over het hoofd zien.

2.3.3 Patronen uit de natuur

We bereiken een meer systematische en objectieve benadering van bio-geïnspireerd ontwerp als we in de manier waarop de natuur problemen oplost patronen ontdekken, identificeren en classificeren. Het begrip 'patroon' is abstract en niet gebonden aan een bepaalde discipline en/of context. Alexander geeft een uitputtende definitie van 'patroon' (Alexander, Ishikawa and Silverstein 1977):

'Elk patroon is een driedelige regel, die een relatie uitdrukt tussen een bepaalde context, een probleem en een oplossing. Als element in de wereld is elk patroon een relatie tussen een bepaalde context, een bepaald krachtsysteem dat zich in die context herhaaldelijk voordoet, en een bepaalde ruimtelijke configuratie die deze krachten in staat stelt zichzelf op te lossen. Als taalelement is een patroon een instructie die laat zien hoe deze ruimtelijke configuratie steeds weer kan worden gebruikt om het gegeven krachtsysteem op te lossen waar de context dat relevant maakt.'

De structuur, die het probleem, de oplossing en de context met elkaar verbindt, wordt verklaard aan de hand van onderstaande sjabloon (Salustri 2005):

1. *Naam van het patroon:* een korte, beschrijvende naam die snel de bedoeling van het patroon weergeeft.
2. *Probleemstelling:* een beknopte beschrijving van het probleem, met inbegrip van de context waarin het patroon kan worden toegepast en de krachten of drijfveren die het probleem veroorzaken en die moeten worden opgelost om een succesvolle oplossing te verkrijgen.
3. *Daarom:* de oplossing (met inbegrip van eventueel vereiste taken), hoe het resultaat wordt gebruikt, waarom de oplossing werkt, en de relatie met andere patronen. De oplossing lost de krachten of drijfveren op, waardoor het systeem van een ongewenste naar een meer gewenste toestand overgaat. Voorbeelden uit verschillende velden kunnen aantonen dat de probleem-oplossingsset terugkerend en algemeen relevant is.

4. *Maar:* de gevolgen van het toepassen van de oplossing om 'verrassingen' te helpen voorkomen. Kan ook laten zien hoe de oplossing de context van het probleem verandert, hetzij door tegenstrijdigheden tussen krachten/drijfveren op te heffen, hetzij door op een ander niveau te werken dan het oorspronkelijke probleem (substelsysteem of supersysteem).
5. *Zie ook:* verwijzingen naar verwante patronen die niet in andere delen van het patroon worden genoemd.

Een patroon is geen op zichzelf staand geheel, maar maakt deel uit van een context van op elkaar inwerkende patronen. Meestal worden de patronen binnen de context gekenmerkt door een hiërarchische structuur, zodat de interactie kan plaatsvinden op een vergelijkbaar niveau (ons patroon interageert met andere patronen op hetzelfde niveau), op een hoger niveau (omvat ons patroon) en op een lager niveau (component). Dit netwerk van patronen definiëren we als patronentaal en de regels die ten grondslag liggen aan hun interactie kunnen we beschouwen als de 'grammatica' (Hoeller, et al. 2007). De zoektocht naar patronen op technologisch gebied maakte de ontwikkeling mogelijk van een systematische en gestandaardiseerde methodologie voor technisch ontwerp, genaamd TRIZ, acroniem van *Teoriya Resheniya Izobreatatelskikh Zadatch* (vrij vertaald: 'de theorie van het inventief oplossen van problemen'). Deze ontwerpmethodologie is ook bekend om de succesvolle overdracht van verschillende uitvindingen en oplossingen van het ene naar het andere technische gebied. Genrich Altshuller ontwikkelde deze ontwerpmethodologie op basis van de identificatie en classificatie van de onderliggende patronen van menselijk ontwerp (Altshuller 1999). Op basis van analyse van meer dan drie miljoen patenten identificeerde Altshuller de patronen van oplossingen voor technische uitdagingen. Door deze patronen te analyseren is het ook mogelijk om de middelen (energie, materiaal, informatie, tijd, enzovoort) te bepalen die de mens gebruikt om zijn technische problemen op te lossen (figuur 1a). Vincent was een pionier op het gebied van patroonidentificatie binnen de context van de biologie. Hij analyseerde vijfhonderd biologische systemen om de TRIZ-ontwerpmethodologie over te kunnen zetten naar het biologiedomein BioTRIZ (Vincent, et al. 2006). Deze eerste patronen uit de natuur maakten een voorlopige vergelijking mogelijk tussen de strategieën die door de mens en de natuur worden toegepast om problemen op te lossen, en daarbij vond men slechts een zeer beperkte overlap. Dit betekent dat onze methode om problemen op te lossen zeer verschillend is van de methode die de natuur gebruikt. Dit blijkt ook uit het diverse en duurzamer gebruik van hulpbronnen door de natuur om problemen op te lossen (figuur 1b). Om bio-geïnspireerd ontwerp te voorzien van een systematisch kader dat vergelijkbaar is met het kader dat voor de TRIZ is ontwikkeld, is het noodzakelijk:

- de patronen in de oplossing van technische problemen te herkennen (het oorspronkelijke TRIZ-systeem);
- de patronen in de oplossing van problemen in de biologie te herkennen (ontwikkeling van een gemodificeerd BioTRIZ-systeem);

- deze patronen compatibel te maken binnen een nieuw algemeen biomimetisch TRIZ-systeem.

2.4 Onderwijs en de praktijk

Biomimicry is multidisciplinair en vereist samenwerking tussen zeer verschillende disciplines (techniek, economie, scheikunde, materiaalwetenschappen, biologie, enzovoort). In de loop der jaren ontwikkelden deze disciplines zich op basis van een reductionistische benadering en ze kennen verschillende jargons, perspectieven en denkwijzen die de onderlinge kennisuitwisseling belemmeren. Om zich uit te kunnen drukken, kan biomimicry beter benaderd worden vanuit een interdisciplinair proces dat over de grenzen van de verschillende disciplines heen gaat. In het algemeen kunnen we een grens beschouwen als een sociaal-cultureel verschil dat leidt tot discontinuïteit in actie en interactie. Daarentegen is *boundary crossing* gerelateerd aan het feit dat iemand de grens overgaat van het ene naar het andere gebied en aan interacties tussen verschillende domeinen (Akkerman and Bakker 2011). Het biomimicry-onderwijs kan daarom niet voorbijgaan aan de vraag: welk dialogisch leermechanisme vindt plaats aan de grenzen? Akkerman en Bakker hebben in hun overzichtsartikel over *boundary crossing* en *boundary objects* vier leermechanismen geïdentificeerd die zich aan de grenzen afspelen: identificatie, coördinatie, reflectie en transformatie. In deze context omvat leren in brede zin nieuwe inzichten, identiteitsontwikkeling en verandering van praktijken. Transformatie is een leermechanisme dat beter bij biomimicry past. Het leidt tot ingrijpende veranderingen in de praktijk, mogelijk zelfs tot het ontstaan van nieuwe tussenvormen die we gewoonlijk als grenspraktijk definiëren. Daarom kunnen we biomimicry in dit kader ook op deze manier definiëren. Transformatie begint altijd met een *confrontatie-proces* waarin een gebrek of een probleem de verschillende domeinen dwingt om hun huidige praktijken en onderlinge relaties te veranderen. Een tweede proces dat plaatsvindt, is de *herkenning* van een gedeelde probleemruimte die wordt begrensd door de confrontatie. Voor biomimicry is de gedeelde probleemruimte het milieu (biomen, ecosystemen), dat wordt beïnvloed door verschillende onderling verbonden problemen, en niet slechts één biologisch systeem met een specifiek probleem. Een derde proces in de transformatie is *hybridisatie*. Bij een bepaalde probleemruimte gaan praktijken die hun grenzen kunnen overschrijden een creatief proces aan, waarbij iets hybride - dat wil zeggen een nieuwe culturele vorm - ontstaat. Bij hybridisatie worden ingrediënten uit verschillende contexten gecombineerd tot iets nieuws en vreemds. Een vierde proces dat in de beschrijvingen van transformatie te vinden is, is de *kristallisatie* van het gecreëerde. Met andere woorden, om iets hybride aan de grens te creëren is één ding, maar het is iets heel anders om het in de praktijk te verankeren, zodat het echte gevolg heeft.

Het tweede deel van dit hoofdstuk gaat over het biomimetische ontwerpproces dat we willen toepassen in de projecten van het lectoraat Biomimicry. Studenten, docenten en onderzoekers uit verschillende vakgebieden voeren de projecten uit. De teams hanteren in de projecten de holistische probleemgerichte benadering, zodat ze uitgedaagd

worden met een probleem. Het probleem wordt uitgedrukt in termen die betrekking hebben op het probleemgebied. Het team vertaalt het probleem daarom met behulp van functionele modellering in een 'taal' die begrijpelijk is voor alle teamleden. In deze fase is begeleiding door een bioloog van groot belang omdat hij verantwoordelijk is voor het uitdrukken van het probleem in termen, functies en trefwoorden die betekenisvol zijn voor het biologische domein. Deze stap levert trefwoorden op. Deze trefwoorden worden gebruikt voor de voorlopige identificatie van potentiële biologische oplossingen op basis van zoekacties in een biologiedatabank zoals Asknature.org. Het hoofddoel van deze fase is niet om onmiddellijk oplossingen voor ons probleem te genereren, maar om de grootte of schaal van de organismen te bepalen waarin we de biologische oplossingen van het probleem kunnen vinden (cellen, organisme, planten, ecosysteem). In deze voorstudie gaat het team na op welke schaalgrootte de potentiële oplossingen voor de problemen liggen en gaat vervolgens op zoek naar een specialist op het gebied van biologie (microbioloog, plantenbioloog, ecooloog, enzovoort). Samen met deze specialist identificeert het team de biologische systemen die een mogelijke oplossing voor het probleem kunnen vormen. De biologiespecialist neemt de wetenschappelijke literatuur over de mogelijke biologische oplossingen door en adviseert het team over wie de beste bio-geïnspireerde oplossing voor de uitdaging zou kunnen bieden, en daarmee de beste kandidaat is. De inschakeling van een biologiespecialist, die de taal van de specifieke wetenschappelijke literatuur begrijpt, voorkomt dat nuttige biologische informatie die relevant is voor de probleemoplossing verloren gaat. De potentiële oplossingen voor het probleem zijn te vinden onder de echte doorzetters: de organismen of systemen die overleven in extreme omgevingen die relevant zijn voor het probleem, bijvoorbeeld een organisme in de woestijn of een tropisch milieu. Zodra het team samen met de biologiespecialist het biologische systeem heeft geïdentificeerd dat het meest in aanmerking komt voor de probleemoplossing, vertaalt het het biologische systeem in termen en functies die begrijpelijk zijn voor het probleemgebied. Na deze fase volgt de productrealisatie en -beoordeling. Het is van het grootste belang dat onderzoekers gedurende het hele ontwerpproces de interactie tussen de teamleden observeren; dit zal hen in staat stellen om methodologieën en strategieën te extrapoleren die gericht zijn op het faciliteren van kennisdeling met het biologische domein.

Bio-geïnspireerd ontwerp, uitvoerig beschreven in de voorgaande paragrafen, kan bijdragen aan de realisatie van producten die hun taken efficiënter vervullen. Een voorbeeld is het windturbineblad geïnspireerd op de tuberkels van de bultrugwalvis. Het kan windenergie efficiënter met een aanzienlijke geluidsreductie omzetten in elektriciteit. Deze voordelen zijn nutteloos als het productieproces van de windturbinebladen energie-intensief en vervuילend is en/of als de gebruikte materialen giftig en niet recyclebaar zijn. Hierdoor wordt de afvoer ervan zeer milieubelastend. Daarom wordt bij het ontwerpproces rekening gehouden met aspecten die van belang zijn voor de duurzaamheid van de productvervaardiging en van het verwijderingsprocédé; vervolgens is het mogelijk de werkelijke milieueffecten van het product te beoordelen. In deze meer holistische benadering kunnen bio-geïnspireerd ontwerp en biomimicry een sleutelrol spelen in de overgang van een lineaire naar een circulaire economie.



Biomimicry als innovatie-instrument voor de agro-foodsector

Het lectoraat 'Biomimicry: Leren van de natuur voor duurzame oplossingen' is het resultaat van een samenwerking tussen drie hogescholen: Aeres Hogeschool Wageningen, Inholland Delft en Van Hall Larenstein Leeuwarden. Gezien het gemeenschappelijke groene DNA van de drie hogescholen wil het lectoraat-onderzoek aantonen dat biomimicry een innovatie-instrument kan zijn dat via de ontwikkeling van bio-geïnspireerde producten en processen kan worden ingezet om de agro-foodsector duurzamer te maken. Bovendien kan op de natuur geïnspireerd ontwerp worden gebruikt om nieuwe strategieën en modellen te ontwikkelen om het beheer en de logistiek van landbouwbedrijven te verbeteren.

3.1 Uitdagingen in agro-food

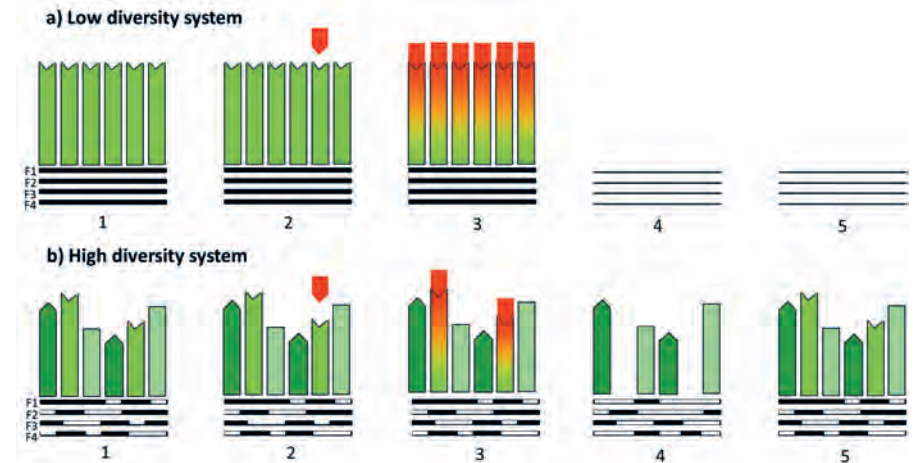
Een van de fundamentele uitdagingen in de 21e eeuw is de almaar toenemende wereldbevolking van voedsel te voorzien, en tegelijkertijd de integriteit van onze natuurlijke ecosystemen te handhaven door behoud van biodiversiteit. Vandaag de dag worden de meeste van onze voedingsmiddelen en vezels geproduceerd door landbouwecosystemen op basis van jaarlijkse akkerbouwgewassen (figuur 10a) die veel minder plant- en diersoorten omvatten dan de autochtone ecosystemen (Crews, et al. 2016). Een tweede duidelijk onderscheid tussen autochtone en landbouwecosystemen betreft successie.

Na een verstoring herstellen autochtone ecosystemen hun functionaliteit door opeenvolgende veranderingen die een reeks interne en regulerende feedbackloops versterken. Daarentegen blijven de ecosystemen van eenjarige gewassen als gevolg van de jaarlijks terugkerende grondbewerking of herbicidetoepassingen in een verstoorde, minder gereguleerde toestand van vroege secundaire successie steken (Smith 2014). Daardoor worden de landbouwecosystemen aangetast door bodemerosieprocessen (Montgomery 2007), onttrekking van voedingsstoffen en water uit de bodem (MEA 2005, Vitousek and Reiners 1975), verlies van organisch materiaal uit de bodem (Davidson and Ackerman 1993), en op uitgebreide schaal woekarend onkruid (Liebman and Mohler 2001). Om aan de almaar toenemende vraag naar voedsel te kunnen voldoen, is het daarom noodzakelijk om de jaarlijkse landbouwmodellen om te vormen tot duurzamere modellen, zoals permacultuur (figuur 10b), die gericht zijn op de versterking van de biodiversiteit in de landbouw.



Figuur 10 – Landbouwecosystemen: a) monocultuur (lage diversiteit); b) permacultuur (hoge diversiteit)

Landbouwmodellen met een grote diversiteit zijn op lange termijn veerkrachtiger en productiever dan landbouwecosystemen die op monocultuur zijn gebaseerd (AskNature.org 2016). Een systeem met lage diversiteit heeft een hoge productiviteit op de korte termijn, maar is zeer gevoelig voor fluctuaties in omstandigheden (figuur 11a). Deze veranderingen kunnen ertoe leiden dat het hele systeem alle functies verliest, wat vervolgens kan resulteren in lage of geen productiviteit. Een systeem met een hoge diversiteit bestaande uit leden die meerdere, elkaar overlappende functionele rollen vervullen, is misschien niet zo productief op de korte termijn, maar vertoont meer stabiliteit en productiviteit op de lange termijn. Bij fluctuaties in de omstandigheden (figuur 11b) zijn de omstandigheden slechts van invloed op een klein deel van het systeem. Bijgevolg hebben deze veranderingen slechts een beperkte invloed op de productiviteit, aangezien de overblijvende leden en de plaatsvervangende leden alle functies van het ecosysteem blijven vervullen. Enerzijds is de versterking van de biodiversiteit in de landbouw de routekaart naar een veerkrachtigere en duurzamere agro-voedingssector; anderzijds levert de verschuiving naar landbouwmodellen met een grote diversiteit, zoals permacultuur, een aantal



Figuur 11 – Vergelijking van landbouwsystemen met lage diversiteit (a) en hoge diversiteit (b)

relevante problemen op. Als deze problemen niet worden opgelost, kunnen ze de grote verspreiding van meer biodiverse landbouwecosystemen in de weg staan. Deze problemen hebben betrekking op het beheer, dat activiteiten omvat als oogsten, monitoren van de plantengroei, meten van de hoeveelheid voedingsstoffen in de bodem, enzovoort. Aangezien deze activiteiten niet zijn geoptimaliseerd en voornamelijk handmatig worden uitgevoerd, zijn de agro-ecosystemen met grote biodiversiteit niet zo kosteneffectief als agro-ecosystemen op basis van monocultuur.

3.2 Bio-geïnspireerde robots in de landbouw

De invoering van automatisering in biodiverse agro-ecosystemen in de vorm van bio-geïnspireerde robots kan de kosteneffectiviteit verbeteren. De robots kunnen worden uitgerust met bio-geïnspireerde grijpers voor de oogst, en met sensoren en visiesystemen om de gezondheid en groei van de planten en het voedingsstoffenniveau in de bodem te bewaken. Daarnaast is het gedrag van insectenzwermen een bron van inspiratie voor de ontwikkeling van algoritmen voor het besturen van zwermen robots die op het veld kunnen worden ingezet.

3.2.1 Grijpers

Een van de grootste uitdagingen bij het realiseren van robots voor de oogst is het ontwerpen van grijpers die in staat zijn om groenten en fruit te oogsten zonder ze te beschadigen. Zacht biologisch materiaal kan inspireren tot nieuwe concepten voor grijpers (Kim, Laschi and Trimmer 2013). Verreweg de meeste dieren hebben een zacht lichaam en zelfs dieren met stijve uitwendige skeletten zoals insecten hebben een lange

levensduur gedurende welke ze bijna volledig zacht zijn (maden, larven en rupsen). De studie van de manier waarop dieren zachte materialen gebruiken om zich in complexe, onvoorspelbare omgevingen te bewegen, kan inzichten van onschatbare waarde opleveren voor nieuwe robottoepassingen, niet alleen in de landbouw, maar ook in de geneeskunde, zoek- en reddingsoperaties, rampenbestrijding en humanitaire hulpverlening. Zachte materialen zijn essentieel voor het 'mechanische ontwerp' van dieren, omdat deze hen in staat stellen zich aan oppervlakken aan te passen, spanning over een groter volume te verdelen en de contacttijd te verlengen. Een eenvoudig voorbeeld vormen de zachte vingerkussentjes en huid van in bomen wonende dieren die zorgen voor betere grip of hechting tijdens het klimmen. Een andere inspiratiebron voor een volledig zachte manipulator is gebaseerd op de anatomie en het mechanisme van de armbeweging van een octopus. Elke octopusarm is voorzien van een zeer complex spiersysteem dat de arm in staat stelt de vorm aan te passen door inkorten, rekken, buigen of draaien, en om krachten te verdelen door lokale of algehele verstijving. Een onderzoeksgroep van de universiteit van Pisa (Laschi, et al. 2012) bouwde een robotarm die op een octopusarm lijkt. De sterk vervormbare mechanische structuur van de robotarm bestaat uit een vlechtwerk van kunststofvezel en de zachte actuators uit veren van geheugenmetaal (Follador, et al. 2012). Die zijn in de dwars- en lengterichting aangebracht om plaatselijke vervormingen mogelijk te maken, zoals weergegeven in figuur 12 (Cianchetti, et al. 2012). Algehele buigingen worden verkregen met behulp van longitudinale kabels die kunnen rekken, verkorten, buigen en verstijven.

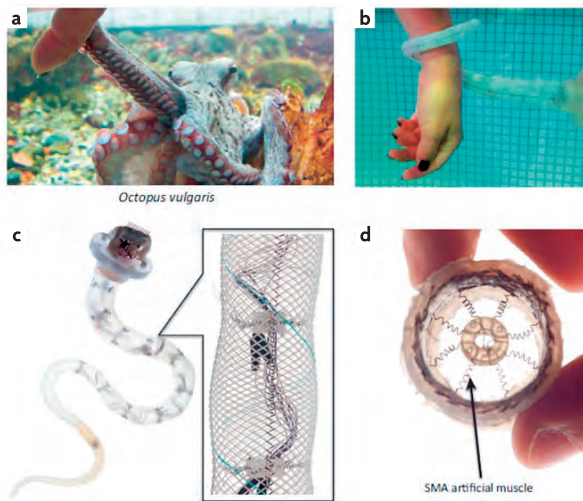


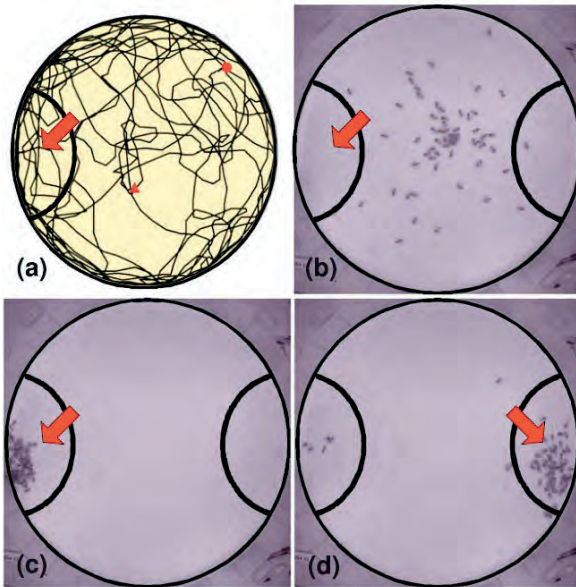
Fig. 12 – Op de octopus geïnspireerde robot. a) Octopus (*Octopus vulgaris*) die met één arm een menselijke vinger vastgrijpt. b) Een octopusachtige robotarm die zich in water om een menselijke pols wikkelt. c) Details van een octopusachtige robotarm. Het externe vlechtwerk vertegenwoordigt de mechanische structuur van de arm, waardoor lokale en algehele vervormingen mogelijk zijn terwijl de arm zijn structuur behoudt. d) Details van de veren van geheugenmetaal die lokale diameterreducties mogelijk maken (Kim, Laschi and Trimmer 2013).

3.2.2 Zelforganiserende zwerm robots

De ontwikkeling van algoritmen is cruciaal om robotzwermen in staat te stellen autonoom in het veld te opereren. Als er een zwerm robots is ontworpen om tomaten te oogsten op een veld waar tomatenplanten niet de enige gecultiveerde planten zijn, bestaat de functie van het algoritme erin de robots te instrueren hoe ze het te oogsten fruit kunnen identificeren, hoe ze de oogstrijpe vruchten kunnen onderscheiden van de nog onvolgroeide vruchten en hoe ze zich kunnen richten op de plekken in het veld met de hoogste fruitconcentraties.

Door het aggregatiegedrag van jonge honingbijen te observeren, heeft Schmickl een zeer eenvoudig, maar robuust en flexibel algoritme ontwikkeld dat bovengenoemde instructies geeft aan robotzwermen (Schmickl 2011). Het idee voor dit algoritme komt voort uit de waarneming van jonge honingbijen in de bijenkorf, waar de jonge, net uitgekomen honingbijen een voorkeurstemperatuur hebben van ongeveer 36°C. Deze jonge bijen hebben de neiging om zich collectief in de warmste centrale gebieden van de bijenkorf te vestigen. Experimenten met enkele jonge honingbijen in een temperatuurgradiënt (ongeveer 30°C - 36°C) toonden aan dat de meeste bijen zich niet permanent in de warmste zone ophouden. In plaats daarvan dwalen de meeste van hen doelloos rond en verlaten ze vaak warme gebieden kort nadat zij die zijn binnengegaan (figuur 13a). Het 'zwermeffect' lijkt dus verantwoordelijk te zijn voor het goed functionerende, collectieve, temperatuurzoekende gedrag van de bijen. Verdere experimenten met een gespecialiseerde arena verschaften inzicht in dit gedrag (Kernbach, et al. 2009): enkele honingbijen zwierven meestal willekeurig rond in de arena, maar stopten als ze tegen een andere bij botsten en wachtten daar dan kort; de duur hing samen met de temperatuur op die plaats. Lage temperaturen resulteerden in een korte wachttijd van de bij, terwijl warmere temperaturen resulteerden in langere wachttijden. Zo vormden zich overal in de arena clusters bijen, maar in de warmere zone duurden deze clusters langer dan in de koudere zones. Uiteindelijk vormden alle clusters één grote cluster nabij het globaal temperatuuroptimum (figuur 13b-d).

Het algoritme dat op basis van het gedrag van de honingbijen is geëxtrapoleerd, kunnen we vertalen voor robots die voor de oogst worden gebruikt. De robots moeten zich groeperen in de zones van het veld met een hoge concentratie te oogsten fruit. Wanneer tijdens een willekeurige zwerftocht twee robots elkaar tegenkomen, zullen ze op die plek een tijdje stoppen afhankelijk van de daar aanwezige hoeveelheid fruit. Die hoeveelheid fruit wordt geschat met behulp van de visiesystemen die op de robots zijn geïnstalleerd. Hoe minder fruit, hoe korter de clustertijd van de robots, en hoe meer fruit, hoe langer de clustertijd van de robots. Naar analogie van de bijen hebben de robots de neiging zich te groeperen in het gebied met de hoogste fruitconcentratie.



Figuur 13 – Experimenteren met bijen in een gespecialiseerde arena (Schmickl 2011).

a) Een enkele bij vindt de temperatuur van 36°C niet optimaal aan de linkerkant, zoals aangegeven door de rode pijl. b) Begin-status van een experiment met 64 bijen. Het (globale) optimum van 36°C bevindt zich links, aangegeven door de rode pijl. Het suboptimum (32°C) bevindt zich rechts. c) De bijen staan collectief gegroepeerd op het optimum. d) Nadat het optimum van 36°C links was uitgeschakeld, konden de bijen opnieuw beslissen en zich groeperen op het nieuwe (globale) optimum van 32°C rechts, aangegeven door de rode pijl. Omgevingstemperatuur: ca. 30°C.

3.3 Bio-geïnspireerde waterfiltratie in de landbouw

Ongeveer 2,5 procent van de totale hoeveelheid water op aarde is zoet water en daarvan is slechts ongeveer 0,007 procent beschikbaar voor menselijke consumptie. Van alle onttrekkingen van zoet water wereldwijd wordt ongeveer 70 procent gebruikt in de landbouw, 20 procent voor industrieel gebruik (inclusief energie) en 10 procent voor watergerelateerde behoeften van huishoudens, instellingen, gemeentelijke systemen en kleine en middelgrote bedrijven (Gonzalez-Perez and Persson 2016, Gleick 1993). Aangezien de landbouw het grootste deel van het beschikbare zoet water onttrekt, is het geen verrassing dat de belangrijkste bron van waterverontreiniging afkomstig is van landbouwactiviteiten, die jaarlijks 140 miljoen ton meststoffen en enkele miljoenen tonnen pesticiden nodig hebben. In de afgelopen tien jaar is naast de conventionele (stikstofverbindingen, fosfor, micro-organismen, enzovoort) en niet-conventionele verontreinigende stoffen, zoals zware metalen en koolwaterstoffen, nog een andere bron van verontreinigende stoffen

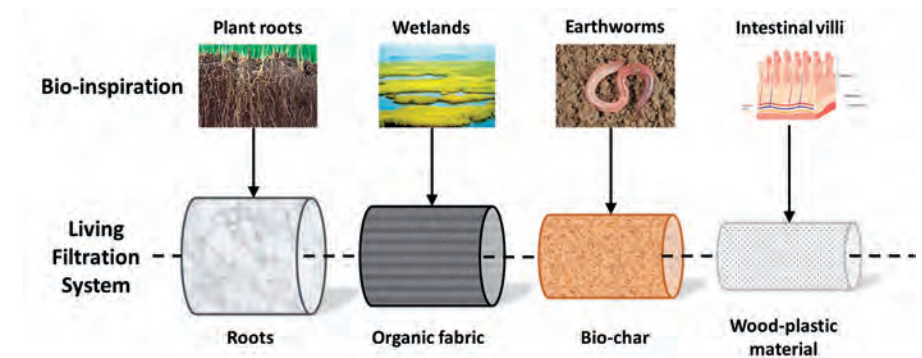
opgedoken, namelijk farmaceutische producten en producten voor persoonlijke verzorging. Door de hoge polariteit en de lage vluchtigheid worden de meeste farmaceutische producten gemakkelijk getransporteerd en geloosd in het watercompartiment.

De volgende twee hoofdstukken beschrijven bio-geïnspireerde filtratiesystemen. Het eerste, het levende filtratiesysteem, is ontworpen voor landbouwtoepassingen; het tweede, het vloeistof-gate-systeem, heeft een veel breder toepassingsgebied.

3.3.1 Levend filtratiesysteem

Aan de universiteit van Oregon (VS) ontwikkelde een ontwerpteam het “Living Filtration System” (LFS): een bio-geïnspireerd waterfiltratieconcept dat is ontworpen om de impact van de landbouw op het milieu te beperken (Earthworm-inspired innovation 2016). De ontwerpers lieten zich voor de ontwikkeling van dit concept inspireren door de vorm en functie van aardwormen, wetlands en de dunne darm van de mens. Deze overgangstechnologie is ontwikkeld om conventionele drainagesystemen in de landbouw te vervangen en overtollige voedingsstoffen in afstromend water op te vangen, het gebruik van meststoffen te verminderen en de bodemgezondheid te verbeteren.

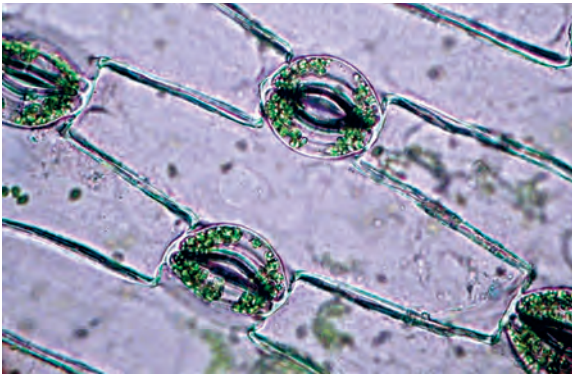
Het levende filtratiesysteem is een meerlaagse leiding (figuur 14). De binnenste laag, gemaakt van hout en kunststof, bootst de functie van darmvlokken na en vertraagt de waterstroom. Een tweede laag is gemaakt van biochar waarmee het spijsverteringsstelsel van de aardworm wordt nagebootst en voedingsstoffen worden vastgehouden. De laatste twee lagen worden gevormd door organische stof en plantenwortels. Ze hebben een tweeledige functie: a) de voedingsstoffen teruggeven aan de planten; b) een gunstige relatie tussen de plantenwortels en de bodemmicro-organismen in stand houden. Het LFS kan het lekken van voedingsstoffen naar waterwegen drastisch verminderen en daardoor ook eutrofiëring voorkomen, een fenomeen dat verantwoordelijk is voor de achteruitgang van de waterfauna.



Figuur 14 – Levend filtratiesysteem

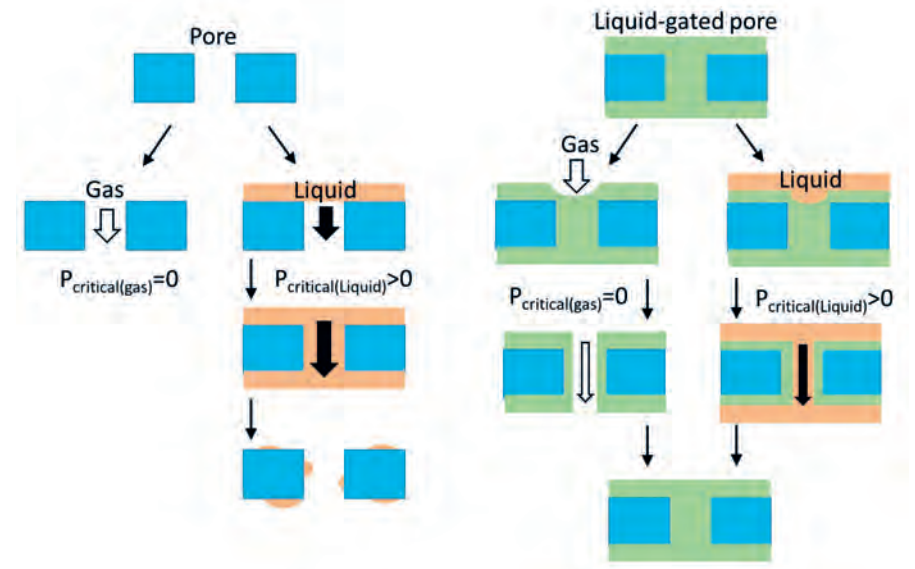
3.3.2 Een biomimetisch vloeistof-gate-systeem

De stomata van een plant zijn de door een dun vloeistoflaagje bedekte huidmondjes in de bladeren en stengels die de uitwisseling van lucht, water en microben tussen de plant en zijn omgeving mogelijk maakt (figuur 15). Het vermogen van dergelijke poriën om meerfasen-transporten te coördineren die zeer selectief en subtiel in gang worden gezet, zonder dat dat tot verstopping leidt, heeft de nodige interesse gewekt. Voor synthetische poriën zijn toepassingen mogelijk variërend van vloeistof-verwerking/filtratie tot 3D-printen en lab-on-chipsystemen (Hou, et al. 2015).



Figuur 15 – Plantcellen en stomata met groene chloroplast

Het mechanisme gebruikt een capillair-gestabiliseerde vloeistof als een omkeerbare, herconfigureerbare poort die in de gesloten stand de poriën vult en afsluit, en in de open stand een vuilafstotende, met vloeistof gevoerde porie creëert (figuur 16). Door de poortvloeistof af te stemmen op de voedingsstroom kan bij een lagere transmembraandruk worden gefilterd dan met een conventioneel filter met dezelfde poriegrootte. Deze liquid-gatingstrategie maakt een efficiënte werking op lange termijn mogelijk en kan worden toegepast op een verscheidenheid aan poriënstructuren en membraanmaterialen, en in vloeistofsystemen op zowel micro- als macroniveau.



Figuur 16 – ‘Liquid-gated’ membraan: vergelijking van eenvoudige en ‘liquid-gated’ poriën



Biomimicry voor sociale innovatie

Biomimicry kan ook effectief zijn voor sociale innovatie. Ecosystemen, insectenzwermen en diergedrag zijn potentiële inspiratiebronnen om innovatie in organisaties (gemeenschappen, bedrijven, industrie, academische en overheidsinstellingen) te stimuleren en wellicht effectievere modellen voor leiderschap te ontwikkelen. Op dit moment worden de meeste activiteiten met betrekking tot de invoering van biomimicry voor sociale innovatie uitgevoerd door biologen die optreden als consultants voor bedrijven die nieuwe creatieve manieren willen verkennen om hun problemen aan te pakken. Meestal zijn de voorgestelde oplossingen niet wetenschappelijk genoeg en lijken de aanbevolen strategieën eerder op gezond verstand dan op de natuur te zijn gebaseerd. Daarom is het ook op dit gebied van groot belang om een systematische benadering te ontwikkelen om problemen voor de organisaties op te lossen op basis van meer geconsolideerde wetenschappelijke gronden.

Uit een eerste literatuuronderzoek naar het gebruik van biomimicry voor sociale innovatie is gebleken dat de wetenschappelijke output op dit gebied niet erg groot is (McGregor 2013, Patel and Mehta 2011, Richardson 2010). Dit betekent dat de toepassing van biomimicry voor sociale innovatie vrijwel een onbekend onderzoeksveld is. Daarom zal het lectoraatonderzoek op dit gebied zich eerst richten op een dieper onderzoek van de literatuur. Tegelijkertijd zal het bedrijven en organisaties interviewen om hun problemen te kunnen analyseren. Door deze tweeledige benadering kunnen we de onderzoeksvragen voor dit biomimicry-toepassingsgebied beter formuleren.

Bedrijven, universiteiten en overheidsinstellingen zijn geen geïsoleerde entiteiten en hebben doorgaans een complexe organisatiestructuur. Zo kan een bedrijf uit meerdere onderling verbonden componenten bestaan. De interactie tussen deze componenten verloopt via stromen van informatie, materialen, medewerkers, enzovoort. Bovendien is een bedrijf ingebed in een structuur op een hoger niveau die de markt, maatschappij, leveranciers, enzovoort, omvat. Zoals blijkt uit tabel 1 kunnen we door een beter begrip van natuurlijke ecosystemen innovatieve strategieën ontwikkelen om het reactievermogen te verbeteren of om bedrijven beter bestand te maken tegen marktvariaties. Zodra modellen die het gedrag van ecosystemen beschrijven - met name van ecosystemen die worden gekenmerkt door abrupte veranderingen en/of veranderingen in de milieuomstandigheden - voldoende zijn omgezet, kunnen organisaties die gebruiken om nieuwe organisatiemodellen te ontwikkelen en hun veerkracht en efficiëntie te vergroten.

5

Onderzoekslijnen van het lectoraat Biomimicry

Hieronder vatten we de belangrijkste onderzoekslijnen van het lectoraat Biomimicry samen:

- Bio-geïnspireerde robots voor een duurzamere agro-foodsector;
- Bio-geïnspireerde filtratiesystemen om de waterkwaliteit in de landbouw te verbeteren;
- Bio-geïnspireerde strategieën om het reactievermogen van organisaties te vergroten;
- Ontwikkeling van methodologieën om kennisoverdracht in een multi-/interdisciplinaire omgeving mogelijk te maken.

De ontwikkeling van de genoemde onderzoekslijnen is gebaat bij de samenwerking met de andere lectoraten van de drie hogescholen (Aeres Hogeschool Wageningen, Inholland, Van Hall Larenstein). Naast wetenschappelijke en technische ondersteuning bieden ze de mogelijkheid om de prestaties van 'bio-geïnspireerde producten', ontwikkeld binnen de projecten die geassocieerd zijn met biomimicry-onderzoekslijnen, te vergelijken met de prestaties die verkregen zijn met behulp van het 'traditionele' ontwerp.

Dankbetuiging

In de eerste plaats ben ik de colleges van bestuur van Aeres Hogeschool, Inholland en Van Hall Larenstein zeer erkentelijk voor mijn benoeming tot lector. Ik voel me zeer bevoorrecht om bij deze instellingen te mogen werken, vooral omdat het mij de kans geeft om vriendelijke, goed geïnformeerde mensen te ontmoeten die mijn beroepsleven verder zullen verrijken.

Graag wil ik de leden van de stuurgroep van het lectoraat biomimicry, Madelon de Beus, Egbert Bol en Betty Johans bedanken. Ik waardeer jullie inspanningen om de behoeften en wensen van de drie universiteiten op elkaar af te stemmen om daarmee de activiteiten van het lectoraat te vergemakkelijken. Bovendien zijn jullie er altijd voor mij wanneer ik een probleem heb of advies nodig heb: dank! Een bijzonder woord van dank is verschuldigd aan Madelon de Beus voor haar constructieve lezing van het boek voorafgaand aan de publicatie en voor haar nuttige opmerkingen. Daarnaast wil ik Marije Aalders bedanken voor de coördinatie van de activiteiten rond de voorbereidingen voor de inaugurele rede en ook voor het oneindige geduld dat zij toonde bij het inwilligen van mijn verzoeken.

Ik wil ook de lectoren, docenten en onderzoekers van de drie hogescholen bedanken die ik tijdens de eerste maanden van het lectoraat heb ontmoet. De discussies die ik met jullie heb gevoerd over biomimicry en andere onderwerpen hebben mij een dieper inzicht gegeven in de huidige uitdagingen van bio-geïnspireerd ontwerp. Een speciaal woord van dank gaat uit naar de lectoren van Aeres Hogeschool Wageningen, Niek van den Berg, Frank de Jong en Manon Ruijters, die mij kennis hebben laten maken met de sociale wetenschappen en de onderwijsstheorie, onderzoeksgebieden die mij tot voor kort totaal onbekend waren. Mijn dank gaat ook uit naar Nathalie de Ridder en Katrin Tazelaar voor de nuttige brainstormsessies en voor de kennismaking met de complexe organisaties van de hogescholen.

Ik wil ook mijn vrouw en zielsverwant Giulia bedanken. Mijn dank betreft niet alleen de prachtige illustratie op de voorpagina van het boek, maar vooral ook de oneindige liefde en steun die ik elke dag van jou ontvang. Zonder jou had ik dit boek nooit geschreven!

Tot slot wil ik mijn ouders Maria en Salvatore enorm bedanken; jullie leiding, aanmoediging en steun, maar bovenal liefde, hebben mij gemaakt tot wie ik nu ben. Op 20 april zal ik de jeugdige glimlach van mijn moeder het meest missen... maar ze zal er ook bij zijn, ik hoef alleen maar door de wolken te kijken.

Mauro Gallo

Wageningen, 6th April 2018

Literatuur

- Akkerman, S. F., and A. Bakker. 2011. "Boundary Crossing and Boundary Objects." *Review of Educational Research* 81 (2): 132-169.
- Alexander, C., S. Ishikawa, and M. Silverstein. 1977. *A pattern language: towns, buildings, construction*. London: Oxford University Press.
- Altshuller, G. 1999. *The innovation algorithm, TRIZ, systematic innovation and technical creativity*. Worcester: MA: Technical Innovation Center Inc.
- AskNature.org. team. 2016. *Plant species diversity creates long-term stability*. January 23. Accessed March 29, 2018. <https://asknature.org/strategy/plant-species-diversity-creates-long-term-stability/#.Wrohl4hubcs>.
- Baumeister, D., J. M. Benyus, J. Dwyer, S. Ritter, and R. Tocke. 2011. *Biomimicry resource handbook: a seed bank of knowledge and best practices*. Biomimicry institute and the Biomimicry Guild.
- Benyus, J. M. 1997. *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York: William Morrow & Co.
- Cianchetti, M., M. Follador, B. Mazzolai, P. Dario, and C. Laschi. 2012. "Design and development of a soft robotic octopus arm exploiting embodied intelligence." *IEEE International conference*. Saint Paul, MN, USA. doi:10.1109/ICRA.2012.6224696.
- Crews, T. E., J. Blesh, S. W. Culman, R. C. Hayes, E. S. Jensen, M. C. Mack, M. B. Peoples, and M. E. Schipanski. 2016. "Going where no grains have gone before: From early to mid-succession." *Agriculture, Ecosystems and Environment* 223-238.
- Davidson, E. A., and I. L. Ackerman. 1993. "Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils." *Biogeochemistry* 20: 161-193.
2016. *Earthworm-inspired innovation*. September 15. Accessed March 2018. <https://biomimicry.org/earthworm-inspired-innovation-wins-10k-living-product-prize/>.
- Follador, M., M. Cianchetti, A. Arienti, and C. Laschi. 2012. "A general method for the design and fabrication of shape memory alloy active spring actuators." *Smart Materials and Structures* 21 (11).
- Gleick, P.H. 1993. *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Gonzalez-Perez, A., and K. M. Persson. 2016. "Bioinspired Materials for Water Purification." *Materials* 9 (447).
- Helms, M., S. Vattam, and K. A. Goel. 2009. "Biologically Inspired Design: Process and Products." *Design Studies* 30 (5): 606-622.
- Hoeller, N., F. Salustri, D. De Luca, M. P. Zari, M. Love, T. McKeag, E. Stephens, J. Reap, and L. Sopchak. 2007. "Patterns from Nature." *Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics*. Springfield, Massachusetts, USA.

- Hou, X., Y. Hu, A. Grinthal, M. Khan, and J. Aizenberg. 2015. "Liquid-based gating mechanism with tunable multiphase selectively and antifouling behaviour." *Nature* 519: 70-73.
- Hwang, J., Y. Jeong, J. M. Park, K. H. Lee, J. W. Hong, and J. Choi. 2015. "Biomimetics: forecasting the future of science, engineering, and medicine." *International Journal of Nanomedicine* 10: 5701-5713.
- Kernbach, S., R. Thenius, O. Kornienko, and T. Schmickl. 2009. "Re-embodiment of honeybee aggregation behavior in an artificial micro-robotic swarm." *Adaptive Behavior* 17: 237-259.
- Kim, S., C. Laschi, and B. Trimmer. 2013. "Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics." *Trends in Biotechnology* 31 (5): 287-294.
- Laschi, C., M. Cianchetti, B. Mazzolai, L. Margheri, M. Follador, and P. Dario. 2012. "Soft Robot Arm Inspired by the Octopus." *Advanced Robotics* 26 (7): 709-727.
- Liebman, M., and C. Mohler. 2001. "Weeds and the soil environment." In *Ecological Management of Agricultural Weeds*, edited by M. Liebman, C. L. Mohler and C. P. Stave, 210-268. Cambridge UK: Cambridge University Press.
- Mathews F. 2011. "Towards a Deeper Philosophy of Biomimicry." *Organization & Environment* X (XX): 1-24.
- McGregor, S. L. T. 2013. "Transdisciplinarity and Biomimicry." *Transdisciplinary Journal of Engineering & Science* 4: 57-65.
- MEA, (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Biodiversity Synthesis*. Washington, D.C.: World Resources Institute.
- Montgomery, D. 2007. *Dirt: The Erosion of Civilizations*. Berkeley, California: University of California Press.
- Nagel, J. K. S., R. B. Nagel, R. A. Stone, and D. McAdams. 2010. "Function-based, biologically inspired concept generation." *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 24: 521-535.
- Patel, S., and K. Mehta. 2011. "Life's Principles as a Framework for Designing Successful Social Enterprises." *Journal of Social Entrepreneurship* 2 (2): 218-230.
- Richardson, P. 2010. "Fitness for the future: applying biomimetics to business strategy." *PhD Thesis*. Bath: University of Bath.
- Salustri, F. A. 2005. "Using Patterns Languages in Design Engineering." *International Conference on Engineering Design*. Melbourne.
- Schmickl, T. 2011. "How to Engineer Robotic Organisms and Swarms." In *Bio-Inspired Self-Organizing Robotic Systems*, edited by Y. Meng and Y. Jin, 25-52. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schmitt, O. 1969. "Some Interesting and Useful Biomimetic Transforms." *Third Int. Biophysics Congress*. 297.
- Shu, L. H., K. Ueda, I. Chiu, and H. Cheong. 2011. "Biologically inspired design." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60: 673-693.
- Smith, R.G. 2014. "A succession-energy framework for reducing non-target impacts." *Agric. Syst.* doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.
- Vakili, V., and L. Shu. 2001. "Towards Biomimetic Concept Generation." *Proc. ASME Design Technical Conferences*. Pittsburgh, PA.
- Vincent, J., N. Bogatyreva, A. Bogatyreva, A. Bowyer, and A. Pahl. 2006. "Biomimetics: its practice and theory." *Journal of the Royal Society Interface* 3 (9): 471-482.
- Vitousek, P. M., and W. A. Reiners. 1975. "Ecosystem succession and nutrient retention: a hypothesis." *BioScience* 25: 376-381.
- Wikipedia. 2018. *Leaf*. Accessed March 2018. <https://en.wikipedia.org/wiki/Leaf#Biomechanics>.
- Yen, J., M. Helms, K. A. Goel, C. Tovey, and M. Weissburg. 2014. "Adaptive Evolution of Teaching Practices." In *Biologically inspired design*, edited by McAdams D. A., Stone R. B. Goel K. A., 153-199. Springer.

Aeres Hogeschool Wageningen

Talent voor groei, dat is waar wij voor staan. Onze hogeschool is geworteld in het agrarisch en educatief hoger onderwijs. Wij richten ons op onderwijs, onderzoek en het delen en toepasbaar maken van kennis. Zo dragen wij bij aan de ontwikkeling van toekomstgerichte, innovatieve professionals. Professionals die in staat zijn om verantwoorde beslissingen te nemen in een complexe wereld, met natuurlijk talent voor duurzaam handelen. We hebben drie faculteiten in respectievelijk Almere, Dronten en Wageningen. Aeres Hogeschool Wageningen is de onderwijsfaculteit.
www.aereshogeschool.nl

Hogeschool InHolland

Op acht locaties, verspreid over de hele Randstad, biedt Hogeschool Inholland een breed scala aan bacheloropleidingen, waaronder Business Studies, Media & Entertainment, Gezondheid, Landbouw, Lerarenopleidingen, Marketing, Techniek, Sociaal Werk, Toerisme, IT, Food, Innovatie, en Finance. Inholland is een ambitieuze instelling die onderwijs biedt aan een cultureel diverse populatie van ongeveer 30.000 studenten in Alkmaar, Amsterdam/Diemen, Delft, Haarlem, Den Haag en Rotterdam.
www.inholland.nl

Van Hall Larenstein University of Applied Sciences

Hogeschool Van Hall Larenstein is een University of Applied Sciences. Wij leiden hoogwaardige, ambitieuze en innovatieve professionals op die bijdragen aan een duurzame wereld. De onderwijs- en onderzoeksactiviteiten zijn gestructureerd rond drie domeinen: Delta Areas and Resources - Food and Dairy - Animal and Business.
www.hvhl.nl

