

BIOARCHITECTUUR

*Bioarchitectuur is een nieuw onderzoeksgebied waarin biologie en architectuur samengaan en vormgenererende processen uit de levende natuur onderzoekt. Hierin speelt evolutie een hoofdrol. Natuurlijke selectie dwingt soorten ertoe om zo efficiënt mogelijk om te gaan met materialen en energie. Dit leidt tot een enorme diversiteit waarin soorten proberen zo adaptief mogelijk te zijn door een meest optimale vorm, gedrag, strategie of chemische reactie te vinden in sterk uiteenlopende leefgebieden. **Adaptiviteit** en **optimalisering** zijn daarom begrippen die in de natuur nauw aan elkaar verwant zijn. Kan dit ook in architectuur worden gevonden of toegepast? Is het in een tijd waarin grondstoffen schaars worden, vervuiling toeneemt niet een noodzaak, en andere kant juist een kans om in een tijd waarin computertechnologie meer en meer in het hedendaagse leven integreert om adaptieve - en daardoor geoptimaliseerde - architectuur te ontwikkelen? Hieronder vind je een begin.*

WERKTITEL: Architectuur als een emergente eigenschap van een Complex Adaptief Systeem (CAS) met zelforganiserende eigenschappen

0.0 SAMENVATTING

We realiseren ons dat de aarde niet meer in alles oneindig is. Ruimte, lucht, water, energie en grondstoffen zijn beperkt. Het is noodzakelijk en absoluut onontkoombaar meer duurzaam en cyclisch te bouwen. Naast het besef van deze mondiale ontwikkeling is er een lokale ontwikkeling gaande, waarin burgers – wonend in de grote planologische woon- en leefgebieden – hun gevoel van eigenheid hebben verloren. Zij zoeken naar zelfredzaamheid. Er is meer burgerinitiatief, en collectief particulier opdrachtgeverschap dat kleinschalige bouwprojecten oplevert met lokale aannemers en uit de omgeving betrokken materialen. Het verminderen van globale planning leidt tot zelforganisatie met een enorme diversiteit aan vormen in de woon- en leefruimte.

De natuur kent geen afval. Output voor de één is input voor de andere. Organismen maken materialen uit grondstoffen uit hun directe omgeving en leven samen in verfijnde en complexe organisaties waarin elk organisme een eigen rol speelt en andere eigenschappen bezit. De verscheidenheid aan vormen is enorm. Kleinschaligheid, lokaliteit, diversiteit en cyclische processen: de natuur is opnieuw een bron van inspiratie. Biomimicry is bijvoorbeeld een nieuw onderzoeksgebied dat zich bezig houdt met het bestuderen van mogelijkheden om biologische oplossingen toe te passen in moderne techniek en organisatievormen.

Naast de vele voorbeelden van cycli laat de natuur ons ook zien hoe biologische processen op elk schaalniveau (bijv. chemische processen in bacteriën, de structuur van botten, de klimatologische werking van termietenheuvels, sociaal gedrag in bijen- en mierenkolonies etc.) erg efficiënt en adaptief kunnen zijn. Natuurlijke selectie dwingt soorten om adequaat op hun omgeving aan te passen en hebben daardoor een voordeel voor het overleven. Naast dit darwinistische principe werken er ook twee andere principes die efficiëntie en adaptatie van biologische processen vergroten. Deze spreken de evolutietheorie overigens niet tegen, maar liggen juist in haar verlengde.

In *On Growth and form* schrijft D'Arcy Wentworth Thompson over de ontwikkeling van vorm van organismen en de transformatie van vorm. Hij laat zien dat exoskeletten van algen opvallend vaak gelijkenissen vertonen met gekristalliseerde zeepbellen. Zeepbellen zijn energetische minimaaloppervlakten die hun vorm ontleen aan een puur fysische krachtspel. Een aantal architecten hebben zich hiermee bezig gehouden. In de jaren 70 en 80 vorige eeuw bestudeerde Frei Otto (bekend van het Olympisch stadion in München) de architectonische mogelijkheden van minimaaloppervlakten. In 2008 namen PTW architects en Arup voor het Beijing National Aquatics center geclusterde zeepbellen in de vorm van een Weaire-Phelan structuur als voorbeeld. Vormvinding (in het Duits *formfindung* genoemd) is een omvattende term waarmee men het ontstaan van vorm uit een (fysisch) krachtspel aangeeft. Parametrisch ontwerpen is in deze zin ook een vorm van vormvinding. De ontwikkeling van dit gebied wordt versneld door de komst van steeds goedkopere en snellere 3d printers, waarmee digitale objecten reëel kunnen worden gemaakt en daardoor beter kunnen worden bestudeerd en beoordeeld.

Een tweede principe komt voort uit onderzoek naar het gedrag van niet-lineaire systemen. In de loop van de jaren 90 van de vorige eeuw verschijnen publicaties over orde, chaos, emergente eigenschappen en complexiteit. Tegenwoordig spreekt

men over complexe adaptieve systemen (CAS). Deze systemen zijn uitermate interessant. Relatief naïeve *agents* kunnen, slechts met een klein aantal gedragsregels en zonder dat er een blauwdruk of globale kennis aan ten grondslag ligt, op systeemniveau bijzondere eigenschappen vertonen. Deze zogenoemde emergente eigenschappen hebben vaak betrekking op een efficiënte strategie, gedrag of vorm. Zij hebben op hun beurt - en dat is wezenlijk voor een CAS - een regulerende invloed op de interacterende *agents*. Men spreekt dan over zelforganisatie of *autopoïese*. Het vinden van de kortste weg naar een voedselbron door mieren en de ontwikkeling van leervermogen door machines en dieren zijn voorbeelden van emergente eigenschappen. De emergente eigenschappen die betrekking hebben op vorm, zijn bijvoorbeeld de klimatologische efficiënte termietenheuvels en de groepsvormen van zwermen vogels, wielrenners en scholen vissen. Emergente vormen uit CAS worden door architecten nog nauwelijks onderzocht. In Nederland is de vakgroep Hyperbody o.l.v. Kas Oosterhuis aan de TU Delft bezig met deze materie.

In deze paper schrijf ik over de beginselen van dit te ontginnen terrein en doe ik een aantal suggesties voor complex adaptieve systemen waaruit architecturale vormen zouden kunnen ontstaan. Tot slot ga ik na wat nodig is om deze vormen om te zetten in echte bouwwerken en of zij wel aan de verwachtingen kunnen voldoen.

januari 2015

1.0 INLEIDING

biologie en architectuur. De combinatie van biologie en architectuur is momenteel zeer populair. Er worden tegenwoordig veel aardse en pure materialen en kleuren gebruikt voor design en sfeer. Vaak erg mooi.

duurzaamheid en cycli. Duurzaam bouwen is natuurlijk een heel belangrijke ontwikkeling dat wortels heeft in biologie en in architectuur. De reductie van energieverbruik en afval en het hergebruik van grondstoffen en materialen is niet zomaar een modegrill maar is een absolute noodzakelijkheid geworden om de aarde in de toekomst leefbaar te houden. Een kernwoord in deze ontwikkeling is de cyclus. Alles in de levende natuur, op elk denkbaar niveau, werkt in cycli. Er bestaat geen afval. Output van de één is input voor de andere.

onderlinge afhankelijkheid. De onderlinge afhankelijkheid maakt een proces erg ingewikkeld. Biologen weten dat al langer. Organismen vormen ingewikkelde ketens van onderlinge afhankelijkheid. Het is uitermate complex maar blijft altijd erg verwonderlijk. Er bestaan talloze voorbeelden van prachtige onverwachte relaties tussen organismen.

prooi-predator systeem. De onderlinge afhankelijkheid vormt een ingewikkelde keten van organismen. De dynamiek van deze keten is mogelijk nog ingewikkelder. Een voorbeeld hiervan is het prooi-predator systeem. Predators (roofdieren) zijn afhankelijk van prooidieren en omgekeerd ook, zoals we zullen zien. Als een populatie roofdieren te groot wordt, ontstaat er een te kort aan voedsel (prooidieren). Sterfte door honger en door toegenomen onderlinge concurrentie verkleint de populatie roofdieren. Door de verminderde jaagdruk krijgen de prooidieren weer de kans om zich te herstellen. Zo ontstaat een cyclus waarin de populatiegroottes in de tijd een golvend patroon laten zien, waarbij de golf van de prooidieren de golf van de roofdieren voorgaat.

stabiele evenwichten. Dit golfpatroon is in de tijd stabiel. Het blijkt echter dat dit maar één van de vele mogelijkheden is waarin het systeem zich kan bevinden. Het stabiele golfpatroon is, zo gezegd, maar een top in een veel groter berglandschap. In dit landschap liggen veel andere bergtoppen waarop het systeem stabiel is, elk met een eigen dynamiek. In de dalen liggen de instabiele evenwichten. Hier fluctueren populatiegroottes zodanig dat er geen patroon in te ontdekken is. Of een evenwicht stabiel is, wordt bepaald door de initiële populatiegrootte, de sterfte- en geboortecijfers. Aanvankelijk is het beter te begrijpen om stabiele evenwichten als bergtoppen te zien. Maar om de dynamiek van een systeem te begrijpen, is het makkelijker om dit precies om te draaien. Je kan je voorstellen dat de toestand van het systeem als een knikker van een bergrug afrolt richting het stabiele evenwicht in het dal. Op deze manier kan je ook begrijpen dat niet elk dal een optimale stabiele evenwicht hoeft te zijn. We spreken daarom ook altijd over een lokaal stabiel evenwicht of optimum. Een flinke "tik" kan het systeem over een lokale berg duwen waardoor een ander (en wellicht optimaler) stabiel evenwicht gevonden wordt.

landschap. In het algemeen kan je zeggen dat elk systeem met eenheden (*agents*) die een onderlinge afhankelijk hebben, een berglandschap van evenwichten (in het kort een evenwichtslandschap of landschap) vormt. Het bovengenoemde prooi-predator systeem, maar ook een systeem van wielrenners, vogels, mieren, mensen of neuronen hebben een landschap. Wat precies de toestand en evenwichten van de systemen zijn en hoe deze eruit zien, is natuurlijk voor elk systeem verschillend. Voor de één is dat een stabiele periodieke verandering van populatiegroottes of een gezamenlijke excitatie, voor de andere is het een stabiele vorm (bijvoorbeeld een peloton, school of een zwerm).

complexe systemen. Deze systemen worden complexe systemen genoemd. Hoewel de *agents* enorm van elkaar kunnen verschillen, kan het gedrag van deze systemen goed met elkaar vergeleken worden en globaal worden bestudeerd. Het blijkt namelijk dat complexe systemen een specifiek gedrag kunnen vertonen. Dit gedrag wordt een emergente eigenschap genoemd. Het is een eigenschap van het systeem dat niet bij de *agents* is ingeprogrammeerd of “bewust” door de *agents* wordt opgezocht, maar in een hogere orde van organisatie vanzelf ontstaat. Een voorbeeld hiervan is het gezamenlijk oplichten van vuurvliegjes of een school vissen dat als één organisme lijkt te bewegen.

complexe adaptieve systemen en zelforganisatie. Deze emergente eigenschappen hebben vervolgens in sommige gevallen een nog bijzondere eigenschap. Deze emergente eigenschap hebben een (negatieve of positieve) invloed op het functioneren van de *agents* zelf. Deze wederkerigheid leidt tot zelforganisatie (ook wel **autopoiese** genoemd). Deze systemen zijn erg flexibel, passen zich snel aan veranderende omstandigheden, en bevinden zich daardoor in een erg stabiel evenwicht. Deze systemen worden ook wel complexe adaptieve systemen (oftewel CAS) genoemd.

In de natuur zijn hier erg interessante voorbeelden van te vinden. Een voorbeeld hiervan is een mierenkolonie dat zonder een ingeprente kaart of een volledig totaaloverzicht leert wat de kortste route naar een bepaalde voedingsbron is. Het groepsgegedrag van wielrenners reduceert de luchtweerstand en bij vogels en vissen ook nog eens de grijpbaarheid van een individu door een roofdier. Bewustzijn en leren zijn ook emergente eigenschappen die uit een complex adaptief systeem ontstaan. Op dit moment gaat het mij om de complexe adaptieve systemen die *vormen* als emergente eigenschap hebben. Want, wellicht zijn een aantal van deze vormen bruikbaar om te bekijken in een architectonische context. Hierover gaat mijn onderzoek.

2.0 ONDERZOEK

Dus: kunnen we een complex adaptief systeem (CAS) maken zodanig dat architectuur ontstaat als een emergente eigenschap met zelforganiserende eigenschappen?

Om te beginnen geef ik een aantal voorbeelden van een CAS met zelforganiserende eigenschappen. Daarna stellen we vast wat de *agents* in ons geval zullen moeten zijn om daarna de regels waarmee de *agents* met elkaar interacteren te bepalen. De interacties zullen moeten leiden tot een bepaalde ruimtelijke structuur die op een of andere manier zelforganiserende eigenschappen heeft. Die, zoals we eerder hebben gezien, ontstaan door een wederkerige inwerking van de globale structuur op de interacterende *agents*.

2.1 Voorbeelden van CAS met zelforganiserende eigenschappen.

2.1.1 Mieren. Mieren vinden de kortste weg naar een voedselbron doordat zij als groep alle mogelijke wegen proberen en een chemisch spoor (feromoon) achterlaten. Dit feromoon wordt door andere mieren waargenomen en gevolgd. Als elke route door een gelijk aantal mieren wordt geprobeerd, zal de geurconcentratie van de kortste route vanzelf het grootst worden. Steeds meer mieren zullen de route bewandelen met de hoogste concentratie, zodat op een gegeven moment de meeste mieren deze route zullen bewandelen. Hoe snel de mieren de route vinden, hangt af van het aantal mieren en de mate van diffusie van het feromoon.¹

Mieren vinden ook de kortste route tussen meerdere voedselbronnen waarvan de oplossing niet voor de hand ligt. In de wiskunde kent men het handelsreizigersprobleem. Dit probleem kenmerkt zich door het gegeven dat elke mogelijke route berekend moet worden en dat dus steeds meer rekenkracht nodig is met een toenemend aantal steden. Mieren vinden

oplossingen die erg interessant zijn. De kortste route, bijvoorbeeld, tussen 4 voedselbronnen (waarvan de punten op de hoeken op van een rechthoek liggen) ligt niet echt voor de hand. De mieren vinden deze route en de vorm van de route is erg interessant.² Steinerpunten zijn punten waarin 3 lijnen (routes) samenkomen waarvan de hoeken onderling 120° zijn. Opmerkelijk is dat deze hoekverdeling ook voorkomt bij 2 zeepbellen. De oppervlaktespanning van zeepbellen (onderling en die met lucht) streeft naar een zo klein mogelijk oppervlak (minimaaloppervlak), waardoor er op een hoekpunt een stelsel van 3 krachten werkt dat zoekt naar een stabiel evenwicht. Als de oppervlaktespanning van de zeepbellen gelijk is, vormen zij een stabiele verbinding met hoeken van 120° .³

Blijkbaar ontstaan in diverse systemen dus ook in een biologische omgeving zoals het CAS van mieren vergelijkbare oplossingen.

Niet alle mieren bewandelen de kortste route. Er is altijd een klein aantal dat andere wegen exploreert. Dit is geen verspilde energie, maar een investering in de toekomst. Als een voedselbron uitgeput is, kunnen deze mieren aangeven dat elders een andere bron beschikbaar is. Zodoende hoeft niet de gehele kolonie opnieuw op onderzoek uit. Dit scheelt tijd en energie. De mierenkolonie heeft zich zodoende dus gesplitst in 2 specialiteiten: voedselhalers en voedselzoekers. Door deze vorm van zelforganisatie werkt de kolonie efficiënter en is adaptief tegen een veranderend aanbod van voedsel.

Je kan je voorstellen dat als er meer zaken naast het voedselzoeken een rol gaan spelen (bijvoorbeeld de verdediging tegen belagers, voortplanting) er een heel ingewikkeld web ontstaat van oplossingen, strategieën, specialisaties en manieren van adaptiviteit. Het kan dus snel ingewikkeld worden.

Conclusie. De zelforganiserende eigenschappen van een mierenkolonie in dit voorbeeld hebben betrekking op het vinden van een optimale route en specialisatie. In bioarchitectuur zijn we op zoek naar een ruimtelijke structuur als gevolg van zelforganisatie. De eerste eigenschap heeft in de verte daarmee iets te maken, de laatste weinig tot niets.

2.1.2 Wielerpeloton. Een ander (en eenvoudiger) voorbeeld van een CAS is een wielerpeloton. Wielrenners fietsen zo snel mogelijk over een parcours richting een eindstreep (ik laat hier het ploegenspel even buiten beschouwing). De fietsers zijn in feite gebonden aan 1 dimensie. Vogels in een zwerm kunnen 2 kanten op en vissen in scholen zelfs 3. In principe zijn dit dezelfde systemen, maar met een verschillend aantal vrijheidsgraden. Craig Reynolds heeft in de jaren 80 van de vorige eeuw een aantal computersimulaties gemaakt. Hij noemde de interacterende *agents boids*.⁴

Fietsers in een peloton mogen niet te dicht op elkaar rijden anders ontstaan er valpartijen. Ze rijden ook niet te ver van elkaar af omdat ze dan bij elkaar uit de wind kunnen rijden. De gemiddelde snelheid van een peloton gemeten over de totale afstand is vaak hoger dan wat een individuele rijder kan halen. Dit betekent dat er verschillende rijders aan de kop van het peloton het tempo zullen moeten aanvoeren. Voor een individuele renner loont het echter om zo weinig mogelijk op kop te rijden. Met deze enigszins tegenstrijdige randvoorwaarden verandert het peloton in een ruimtelijke vorm met een bijzondere dynamica.

De dynamische structuur van een wielerpeloton zou je tot op zekere hoogte met een vloeistof kunnen vergelijken. Langs de straatranden ontstaan patronen die lijken op capillaire werking. Vernauwingen in het parcours leiden tot ophopingen en reductie van snelheid, terwijl in de vernauwingen zelf vaak weer versnellingen voorkomen. Het wielerpeloton lijkt ook een soort temperatuur te bezitten waardoor de structuur zich in sommige gevallen gedraagt als een stroperige vaste stof en soms als een dynamische gasachtige stof waaruit keer op keer renners proberen te ontsnappen. Interessant is te onderzoeken tot in hoeverre deze vergelijking opgaat, met in het bijzonder de faseovergangen.

Het is niet raar dat groepen bewegende mensen met vloeistofmodellen worden beschreven. Zo bestaan er modellen voor de doorstroom van auto's op snelwegen en het gedrag van grote groepen mensen in voetbalstadions op basis van vloeistofdynamica.⁵

Deze dynamiek is anders dan in bijvoorbeeld de 2d en 3d modellen van zwermen vogels en scholen vissen. Het verschil zit in het feit dat het peloton en de individuele renner uiteindelijk een tegenstrijdig belang hebben. Een renner wil voor het

peloton uit als eerste finishen, terwijl vogels en vissen tot het einde bij elkaar proberen te blijven. Dit maakt het wielerpeloton ondanks zijn mono-lineariteit toch erg bijzonder.

conclusie. De zelforganiserende structuur van het wielerpeloton is dus wel een ruimtelijke structuur waarvan de vorm samenhangt met het aantal en de snelheid van de wielrenners, de hoeveelheid luchtweerstand, de breedte van het parcours (t.o.v. de wielrenner) en het doel om als eerste over de finish te komen. De ruimtelijke structuur heeft in dit systeem een veranderlijke wederkerige invloed op de individuele wielrenner, waardoor het systeem dynamisch blijft en feitelijk niet stabiel is.

2.1.3 Computermodellen

De onderstaande modellen zijn gemaakt in Processing 2.2.1. en zijn in principe gebaseerd op de modellen van Reynolds.⁴

De *agents* kennen 3 regels:

1. Stem je bewegingsrichting af op anderen die je kan waarnemen.
2. Trek elkaar aan als je in elkaars nabijheid bent.
3. Stoot elkaar af als je te dicht bij elkaar in de buurt komt.

Model 1. *Wielerpeloton.*

Bijzonderheden. De *agents* bewegen over een smalle strook. Initieel krijgen ze een verschillende bewegingsrichting en dat veroorzaakt een flinke chaos. Na verloop van tijd stabiliseert het systeem. In dit "peloton" zijn er schermutselingen die als golven langzaam naar het achterveld bewegen; soms zijn het er meerdere tegelijkertijd. Deze schermutselingen zorgen ervoor dat het peloton langzaam wordt uitrekt.

Model 2. *Vissen.*

Bijzonderheden. De instellingen zijn hetzelfde als in model 1 maar met één verschil: de *agents* bewegen op een bolvormige (oneindige) wereld (als *agents* het veld uitlopen komen ze aan de andere kant weer tevoorschijn.) Na een hectische beginfase ontstaan verschillende groepjes. De "scholen" bewegen uiteindelijk allemaal dezelfde kant op. Deze groepsvorming ontstaat als *agents* uit elkaars waarnemingsveld blijven en elkaar daardoor geen invloed op elkaar hebben. Dit type groepsvorming vind je ook bij groepen ganzen die slecht hebben zoals bij mist.

Model 3. *Vogels.*

Bijzonderheden. Opnieuw identieke instellingen, behalve dat het waarnemingsveld is vergroot (factor 2,5). Je ziet dat er vrij snel grote groepen ontstaan; soms zelfs één grote. In het begin van de groepsvorming ontstaan er dynamische structuren die ergens een gelijkenis hebben met de dynamische wervelingen van groepen spreeuwen. De dynamiek dooft snel uit door een gebrek aan "versturende" effecten.

Model 4. *Aquarium.*

Bijzonderheden. De instellingen zijn gelijk aan model 1 en 2. De wereld is echter vierkant en klein. De *agents* stoten keer op keer tegen wanden, waardoor heel langzaam een stabiel patroon ontstaat. Het stabiele patroon ontstaat doordat de groep door interne botsingen gedwongen wordt om met een bijna haakse hoek te draaien en of links- of rechtsom rondjes maakt.

2.2 Agents

In paragraaf 2.1 heb ik voorbeelden laten zien waarin de *agents* simpele geometrische eenheden zijn die eventueel personen of andere dieren zouden kunnen voorstellen. De modellen kunnen erg interessante vormen en patronen laten zien. Hiermee beschouw je echter alleen het gedrag van een groep *objecten* in een globale ruimte. Ze zeggen niets over ruimtelijke structuren *an sich* en de specifieke beleving hiervan. Juist hierover gaat architectuur. Onze *agents* moeten dus iets anders zijn.

J.J. Gibson beschrijft in zijn boek *An ecological approach to visual perception* hoe (visuele) waarnemers informatie over diepte en de schaal van de objecten kunnen verzamelen en waarnemen.⁶ Een sleutelrol hierin speelt zijn stelling dat een waarnemer *actief* waarneemt. Hij moet altijd in beweging zijn om te kunnen waarnemen. Dit is dus wezenlijk iets anders dan een cameraoog van een robot. Beweging van het lichaam en hoofd en de zeer snelle bewegingen van de oogballen zorgen voor veranderlijke projecties van de omgeving op het netvlies. Het zijn de juist de veranderingen van de visuele input die essentieel zijn voor visuele waarneming. Het veranderlijke optische veld noemde hij een *optic flow* veld. In feite is dit een vectorveld op een bolvormig projectieveld met de waarnemer als middelpunt. In het vervolg noem ik dit bolvormige veld *eigenruimte*. Het is een ondeelbare ruimtelijke bouwsteen en daardoor prima geschikt als een *agent*. Een *agent* is dus een bewegende eigenruimte.

Naast waarnemen handelt een persoon ook. Aan dit handelen ligt een zekere focus of intentie ten grondslag. De eigenruimte is daardoor niet overal even belangrijk. Minder belangrijke delen kunnen worden ingedikt en anderen kunnen worden uitgerekt. De eigenruimte wordt zodoende vervormd tot een *individuele binnenruimte*. Het punt van observatie blijft natuurlijk altijd ergens *binnen* deze ruimte liggen waardoor de individuele binnenruimte altijd van *binnenuit* wordt ervaren. Een *agent* is dus een bewegende individuele binnenruimte.

De eigenschappen van een *agent* op een rijtje:

1. een *agent* is een ondeelbare maar vervormbare ruimte.
2. mogelijke interacties tussen *agents* hebben betrekking op ruimtes en niet op objecten
3. waarneming en intentie is subjectief
4. op een grotere schaal kunnen (objectieve) ruimtelijke structuren worden bekeken

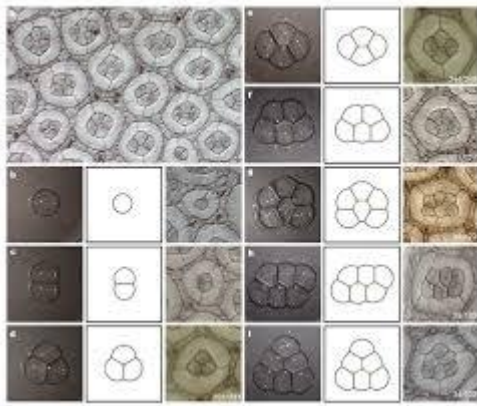
Conclusie: Vervormde eigenruimtes zijn geschikte *agents* omdat zij ondeelbaar, ruimtelijk en plastisch zijn. De globale ruimtelijke structuren zijn per definitie ruimtelijk die architectonisch eventueel interessant zouden kunnen zijn.

2.3 Interacties van individuele binnenruimtes

In paragraaf 2.2 is beschreven dat vervormde eigenruimtes meer geschikt zijn om als *agents* dienst te doen dan simpele geometrische objecten. Vervormde eigenruimtes zijn ondeelbaar, ruimtelijk en plastisch. De globaal gegenereerde structuren zijn per definitie een ruimte. Deze "vormen van ruimte" kunnen natuurlijk architectonisch erg interessant zijn. De verzameling individuele binnenruimtes worden omvat door de *buitenruimte*. Dit is feitelijk de fysische ruimte.

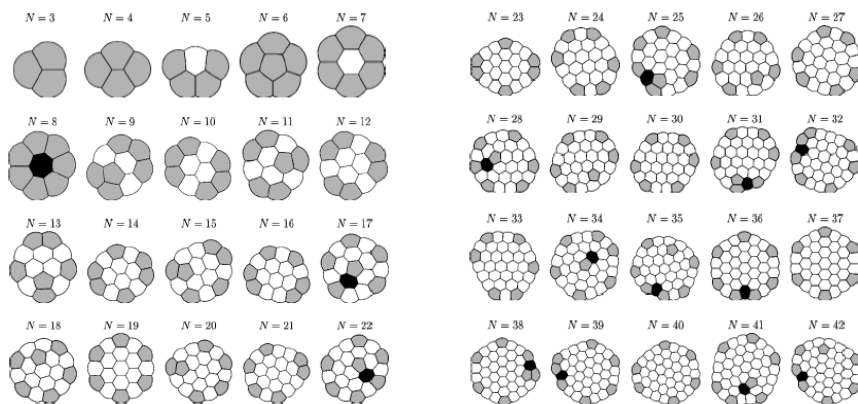
Het grensvlak tussen een binnenruimte en de omliggende *buitenruimte* is plastisch. Het is als een dun vlies makkelijk vervormbaar, beweegbaar en rekbaar. Net zoals een zeepbel. Bekend is dat zeepbellen een vorm zoeken die energetisch optimaal is wat leidt tot een minimale kromming van het oppervlak. Dit wordt een minimaaloppervlak genoemd. Frei Otto heeft minimaaloppervlakten intensief bestudeerd.⁷

Het fysische spel werkt ook als meerdere zeepbellen clusteren. Drie zeepbellen staan bijvoorbeeld nooit in een rijtje. Zij vormen altijd hoeken van 120°. Vier of meer zeepbellen vormen ook bindingen met deze hoek. In figuur 1 zie je de opvallende overeenkomsten tussen zeepstructuren (grijs) en clusters van cellen in verschillende stadia van de ontwikkeling van een embryo (gekleurd)⁸. In het wit zijn de clusters schematisch aangegeven.



figuur 1. Takashi Hayashi & Richard W. Carthew (2004)

Het cluster kan met 6 elementen blijkbaar meerdere vormen aannemen. In figuur 2 zijn de (computer gegenereerde) clusters aangegeven tot aan 42 cellen (met een minimale omtrek van het totale cluster)⁹. Bij $N = 12$ krijgen de cellen midden in de kern een hexagonale vorm. Dit aantal stijgt bij een grotere N . In een recenter artikel (2012) vragen de auteurs zich overigens af of de buitenste omtrek bij een veel grotere N een cirkelvorm heeft of een hexagonale: hun conclusie een hexagoon.¹⁰

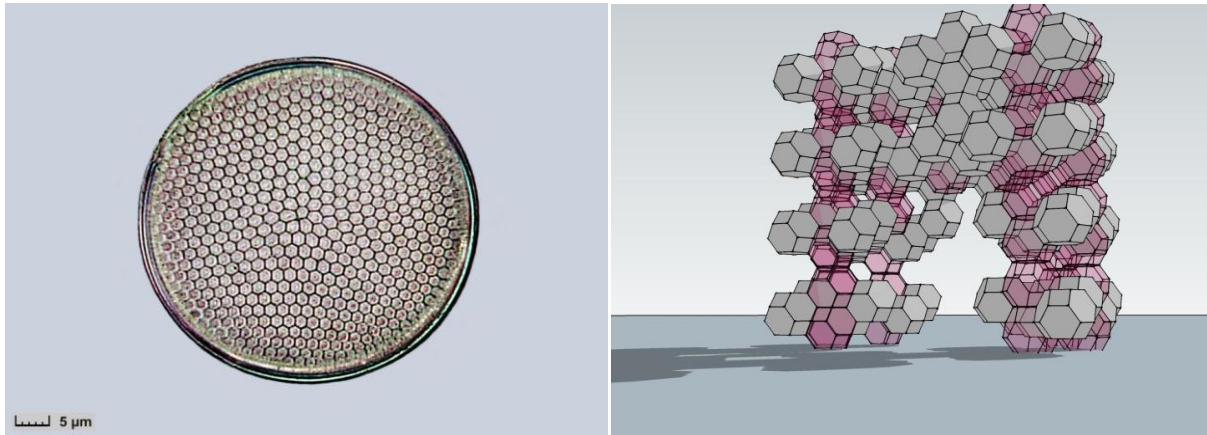


figuur 2. Cox, Graner et al. (2003)

Cellen kan je tot zekere hoogte vergelijken met zeepbellen:

- cellen zijn bolvormig en vervormbaar
- de vorm van cellen wordt voor een groot deel bepaald door de reductie van oppervlakte spanning en benadert een minimaal oppervlak
- cellen bewegen / migreren
- cellen leven in een heterogene omgeving met structuren met diverse eigenschappen
- cellen interacteren

We kunnen vervolgens de analogie van cel- en zeepbelclustering doortrekken naar de interacties van individuele binnenruimten. De individuele binnenruimten zullen - indien zij identiek gevormd zijn - bij een grotere populatiedichtheid een structuur van hexagonalen vormen. Dit is natuurlijk een erg interessante optimale structuur, maar wel 2 dimensionaal. Het hexagonale grid kan namelijk niet verbogen worden in een 3 dimensionale vorm. Buckminster Fuller wist dit.¹¹ Het is alleen mogelijk door hier en daar een paar pentagonalen toe te voegen (zie figuur 3a).



figuur 3. 3a: *Coscinodiscus excentricus*.¹² 3b: Een cluster van Kelvin cellen.

Er bestaat een optimale invulling in een 3 dimensionaal vlak. Het ligt echter niet voor de hand welk object de 3 dimensionale ruimte vult. Eind 19^e eeuw beschreef Lord Kelvin zijn vermoeden dat dit een 14-vlakkig object moet zijn.¹³ Deze tetradecaëder kan worden gevonden door van een dubbele octaëder elke hoek af te knotten. Dit object is later Kelvin cel genoemd. Dit vermoeden bleek echter niet helemaal juist. In de jaren negentig van de vorige eeuw werd bekend dat er een efficiëntere ruimte invulling bestaat.¹⁴ Dit wordt nu de Weaire-Phelan structuur genoemd.

Is de Kelvin cel of Weaire-Phelan structuur bruikbaar als *agent* in ons ruimtelijke model? Kelvin cellen maken een ietwat starre, repetitieve en saaie ruimtelijke structuur (zie figuur 3b). De Weaire-Phelan structuur is een stuk interessanter. Maar in de globale ruimte bevinden zich vaak meerdere *agents* maar niet zoveel dat de gehele ruimte compleet wordt gevuld. Er bestaat ook lege ruimte. Daarnaast is de dynamiek van een volledig gevuld systeem niet erg interessant. En bovendien is de vorm daarvan al bekend.

Conclusie: Het ruimtelijke systeem kan bestaan uit bewegende individuele binnenruimten die zich gedragen als zeepbellen of biologische cellen. De verhouding van volume en het objectoppervlak is daarbij vrijwel optimaal. In een uiterst grensgeval (i.e. hoge dichtheid binnenruimten) hebben zij de vorm van een Weaire-Phelan structuur. De dynamiek van deze ruimtelijke structuur is echter nihil.

2.3.1 CPM

In de theoretische biologie worden veel computermodellen ontwikkeld om biologische processen te begrijpen. Cellulaire automata (CA) worden bijvoorbeeld veelvuldig toegepast. Een CA bestaat uit een 2 dimensionaal grid, waarin elke positie heeft een bepaalde toestand die afhankelijk is van zijn buurcellen. Zo heb je op vrij eenvoudige wijze een complex systeem. De ruimtelijke (en temporale) structuren van toestanden zijn erg interessant. Bekijk de *Game of Life* van John Conway.¹⁵ De *agents* hebben daarentegen geen ruimtelijke eigenschappen. Zij vormen wel ruimtelijke structuren, maar niet dankzij hun eigen ruimtelijkheid. Cellulaire Potts Modellen (CPM) zijn wellicht een veelbelovend alternatief. Theoretisch biologen schrijven over de eigenschappen van CPM modellen en de treffende gelijkenissen met werkelijke cellen, celmigratie en morfogenese.^{16, 17}

Een CPM is, net zoals een CA, een *gridbased* model. De cellen bestaan uit meerdere pixels (in een 2D vlak) of voxels (in een 3D ruimte). Elke pixel of voxel hecht met een zekere affiniteit aan anderen. Hoe groter de affiniteit, hoe sterker de bindingsenergie. De bindingsenergie in de cel is nul. Het celvolume streeft naar een gewenste grootte. Als het volume kleiner is dan het gewenste celvolume dan bezit de cel (potentiële) energie. Het CPM zoekt naar een toestand waarbij de energietoestand van hele systeem minimaal is. In ingewikkelde modellen volstaat het om ergens een pixel van een bepaalde cel (cel 1) te nemen en van één van de buurpixels (een lege ruimte of cel 2) te bepalen of het energetisch optimaler is om zijn toestand te veranderen in cel 1 of niet. Als een verandering optimaler is dan zet het model de verandering door en zo niet dan blijft de situatie zoals het was. Hierna neemt het model een volgende pixel. Dit klinkt misschien vergezocht. Maar als je het model veel pixels en snel achter elkaar laat uitrekenen, ontstaat er een globale ruimte

waarin je de groepjes vierkantjes als virtuele cellen ziet clusteren en voortbewegen. Interessant is ook dat je het model zodanig kan uitvragen dat je de wandeling van een cel langs andere cellen kan zien vanuit het perspectief van deze ene cel. Dit lijkt erg op een simulatie van een wandeling door een 3d ruimte.¹⁷⁷

Het is nu niet moeilijk om een individuele binnenruimte te zien als een groepje voxels dat zich ergens in een globale ruimte bevindt. Als een binnenruimte een andere tegenkomt, ontstaat afhankelijk van de ingestelde affiniteiten een bepaalde dynamiek: binnenruimten kunnen clusteren, elkaar afstoten of iets daar tussen in.

Conclusie: De *agents* (individuele binnenruimten) kunnen interacteren zoals zeepbellen en biologische cellen dat doen. De structuren zijn energetisch optimaal en de regels relatief eenvoudig. Als een globale ruimte compleet gevuld is dan kunnen *agents* geabstraheerd worden in de vorm van Kelvin cellen of een Weaire Phelan structuur, waarbij de laatste het meest interessant is. We constateren tevens dat de dynamiek in een compleet gevulde ruimte nihil is. De globale ruimte bestaat derhalve ook uit lege ruimte en mogelijk uit *agents* die onderling diverse ruimtelijke afmetingen hebben. Dit kan worden gemodelleerd m.b.v. een Cellular Potts Model. Het aantal *agents* en de onderlinge affiniteiten bepalen de dynamiek van het systeem.

3. RESULTATEN

... etc. verder uitwerken

Referenties (voorlopig)

1. Scott Camazine, Jean-Louis Deneubourg, Nigel R. Franks, James Sneyd, Guy Theraulaz, & Eric Bonabeau (2003), *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton University Press.
2. Tanya Latty et al. (2011). *Structure and formation of ant transportation networks*. J. R. Soc. Interface (2011) **8**, 1298–1306 (2 February 2011) (doi:10.1098/rsif.2010.0612).
3. D'Arcy Wentworth Thompson (1992). *On Growth and Form*. Cambridge University Press. Abridged edition by John Tyler Bonner.
4. Craig Reynolds (1986 - present). Boids (simulated flocking). <http://www.red3d.com>
5. G.K. Still (2000). Crowd Dynamics. PhD Thesis, University of Warwick, August 2000.
6. J.J. Gibson (1979). *An Ecological Approach to Visual Perception*. Boston: Houghton Mifflin.
7. Winfried Nerdinger (2005). *Frei Otto: Complete Works: Lightweight Construction - Natural Design*. Birkhäuser Verlag für Architektur
8. Takashi Hayashi & Richard W. Carthew (2004). *Surface mechanics mediate pattern formation in the developing retina*, *Nature* **431**, 647-652 (7 October 2004) (doi:10.1038/nature02952).
9. S. J. Cox, F. Graner, et al. (2003). *Minimal perimeter for N identical bubbles in two dimensions: calculations and simulations*. *Phil. Mag.* vol. 83 (2003), no. 11, 1393–1406.
10. S. J. Cox, F. Morgan, F. Graner (2012). *Are large two-dimensional clusters of perimeter-minimizing bubbles of equal-area hexagonal or circular?* arXiv:1206.3858 [cond-mat.soft].
11. The R. Buckminster Fuller FAQ: Geodesic Domes – Internet explorer. <http://www.cjfeanley.com/fuller-faq-1.html>
12. Afbeelding diatomee *Coscinodiscus_excentricus*. <http://www.microscopyview.com/MENU/400-DIATOM/405-CIR/H405-1011.html>
13. W. Thomson, Lord Kelvin (1887). *On the division of space with minimum partitional area*. *Phil. Mag.* vol. 24 (1887), 503.
14. D. Weaire and R. Phelan (1994). *A counterexample to Kelvin's conjecture on minimal surfaces*. *Phil. Mag. Lett.* vol. 69 (1994), 107-110 (doi:10.1080/09500839408241577).
15. M. Gardner (1970). *Mathematical Games – The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life"*. *Scientific American* **223**. pp. 120–123.
16. Maree, Grieneisen, Hogeweg (2007). II.2 *The Cellular Potts Model and Biophysical Properties of Cells, Tissues and Morphogenesis*. *Mathematics and Biosciences in Interaction*, 107-136. Birkhäuser Verlag Basel/Switzerland.

17. J.B. Beltman, A.F.M. Maree, J.N. Lynch, M.J. Miller, and R.J. De Boer (2007). *Lymph node topology dictates T cell migration behaviour*. J. Exp. Biol., 2007.