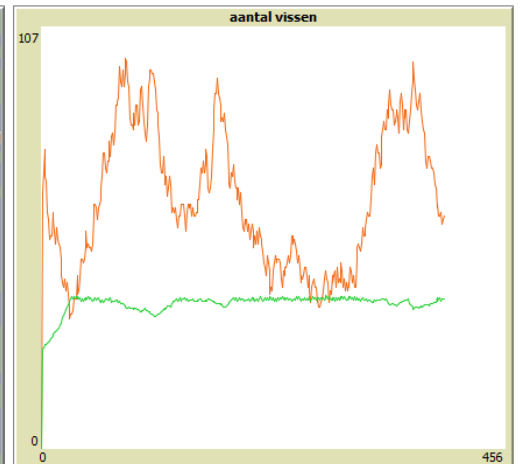
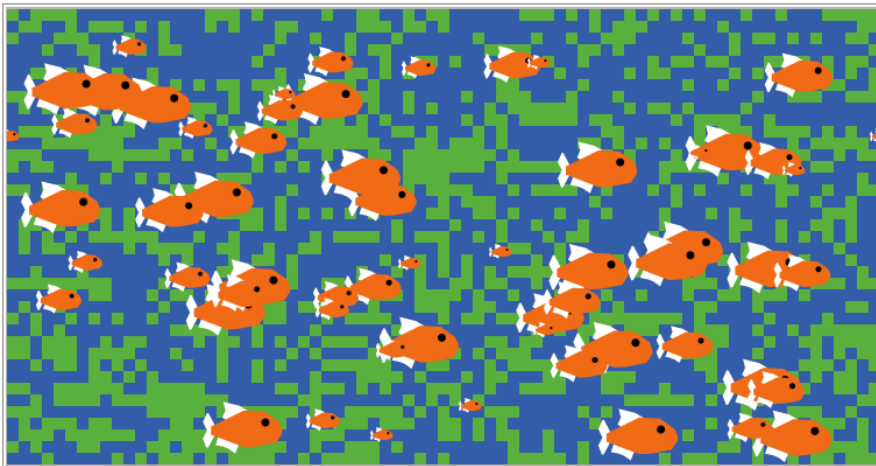


# Agent-based modeling



Domein R: Computational Science

# INHOUD

H1	modellen	3
1.1	Inleiding	3
1.2	Groepsgedrag	3
1.3	Tijd en iteraties	5
1.4	Het doel van modelleren	8
1.5	Onderzoek doen	11
1.6	De volledige modelleercyclus	14

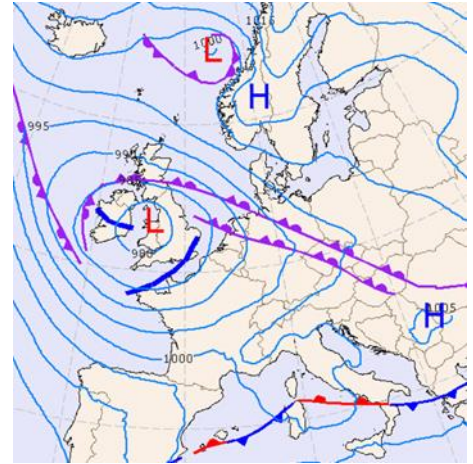
# H1 MODELLEN

## 1.1 Inleiding

Een uitzending van het journaal eindigt standaard met het weerbericht. Hierin doet de weerman een voorspelling van het weer van de volgende dag en de dagen daarna met behulp van weerkaarten zoals in figuur 1.1.

Dit soort voorspellingen wordt gedaan op basis van metingen van weerstations en ervaringen uit het verleden. Om tot een voorspelling te komen en daarmee weerkaarten voor in de toekomst te maken, wordt gebruik gemaakt van een computermodel. Dit soort wetenschap met behulp van modellen wordt *computational science* genoemd.

Je kunt een model gebruiken om een voorspelling te doen, maar ook om iets dat je hebt gezien te kunnen verklaren. Als je een vermoeden hebt hoe iets werkt, kun je dat met een computermodel gemakkelijk en eindeloos testen. Lukt het je om de werkelijkheid te simuleren? Dan is er een goede kans dat je hebt begrepen hoe die in elkaar zit!



FIGUUR 1.1

In dit hoofdstuk leer je een aantal belangrijke begrippen en aandachtspunten als je wilt gaan modelleren. Daarnaast oefen je met het nadenken over modellen en de werkelijke context die zij simuleren.

## Opdracht 1: Modellen

1. In de inleiding wordt gesproken over een model van het weer. Noem minimaal drie voorbeelden anders dan een weermodel waarbij gebruik gemaakt wordt van computermodellen.
2. Het weermodel wordt gebruikt voor de weersvoorspelling. Het algemene doel van dit model is dan *voorspellen*. Bedenk minimaal drie andere algemene doelen van modelleren.
3. Wat betekent het woord *simuleren*?

## Opdracht 2: Vuurmieren



Bekijk de video over samenwerkende vuurmieren.

## 1.2 Groepsgedrag

Vuurmieren (Figuur 1.2) zijn eenvoudige insecten, hoewel ze pijnlijk kunnen bijten. Toch lijken de vuurmieren in de video intelligent gedrag te vertonen. Hoe kan dat?

Dat gedrag is het gevolg van een aantal simpele **regels** waarmee de vuurmier genetisch is geprogrammeerd. De video laat zien dat een grote groep mieren samen een toren kunnen vormen door zich aan elkaar vast te klemmen. Individuele mieren worden niet geplet, omdat ze een simpele regel volgen: *als de druk te groot wordt, laat ik los*.



FIGUUR 1.2

Het simpele gedrag van individuele mieren leidt hier tot complex **groepsgedrag** dat je nooit zou zien als je de mieren afzonderlijk zou bestuderen. Dit groepsgedrag heet **emergent gedrag**. De losse mieren die dit gedrag veroorzaken, worden **agents** genoemd. De agents **reageren** op hun **omgeving** door één of meer simpele regels uit te voeren. Dat zorgt voor groepsgedrag dat je niet zomaar op basis van die simpele regels had kunnen voorspellen.

Je kunt het gedrag van een mierenkolonie simuleren met een computermodel. Hierbij kun je er voor kiezen om de kolonie als één geheel te beschouwen, maar om het groepsgedrag te verklaren, is het vaak beter om te kijken naar de leden van de kolonie: losse mieren dus. Die aanpak heet **agent-based modeling**.

## Opdracht 3: Helden en Lafaards



Bij dit spel zijn jouw klasgenoten en jij de agents. Je krijgt een paar spelregels van je leraar. We gaan kijken welk emergent gedrag dit voor de klas oplevert.

## Opdracht 4: Delen of stelen



Aan het eind van de televisiespelshow *Golden Balls* (figuur 1.3; je kunt het ook op een computer spelen) krijgen de kandidaten de opdracht om de samen opgebouwde geldprijs (*jackpot*) te verdelen. Beide kandidaten moeten kiezen of ze het geld willen delen (*split*) of dat ze de jackpot van de ander willen stelen (*steal*). Maar... het bedrag dat je wint is mede afhankelijk van de keuze van de andere kandidaat.



FIGUUR 1.3

De spelregels zijn als volgt:

- Als beide spelers delen, krijgen ze allebei 50% van het geld
- Als beide spelers stelen, krijgen ze allebei niets (0%)
- Als één van de spelers deelt en de ander steelt, krijgt de stelende speler 100% (en de delende kandidaat niets)



4. Bekijk de video van *Golden Balls*.



5. Klik op het icoontje en speel zelf het spel.

Alice en Bob spelen het spel. De mogelijke uitkomsten van het spel zijn weergegeven in Figuur 1.4. Als Alice deelt, wint zij in het ene geval 50% van de jackpot en in het andere geval niets. Als Alice steelt, wint zij in het ene geval 100% van de jackpot en in het andere geval niets.

Wiskundig kunnen we eenvoudig constateren dat stelen gunstiger is dan delen. Maar zo eenvoudig is het ook weer niet: als iedereen volgens die logica zou spelen, zou er nooit iemand winnen!

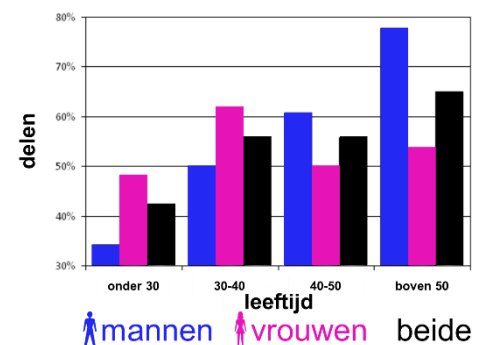
In Figuur 1.5 zie je hoe vaak deelnemers aan het spel in werkelijkheid kiezen voor delen. Wat zou jij doen?

		Alice	
		A deelt	A steelt
Bob	B deelt	50%	100%
	B steelt	0%	0%
		100%	0%

FIGUUR 1.4

- Bedenk minimaal drie onderzoeksvragen die je op basis van Figuur 1.5 zou kunnen beantwoorden.
- Wat zijn de antwoorden die horen bij de door jou bedachte vragen?
- Formuleer twee onderzoeksvragen bij dit spel die niet op basis van Figuur 1.5 kunnen worden beantwoord.
- Stel een hypothese (voorspelling) op bij de door jou bedachte onderzoeksvragen. Welke uitkomst verwacht je hierbij?

Figuur 1.4 brengt het spel schematisch in kaart, maar Figuur 1.5 gaat over menselijk gedrag. Op basis waarvan kiezen mensen? Waar wordt hun keuze door beïnvloedt?



FIGUUR 1.5

- Bedenk drie factoren die de keuze van een kandidaat in de praktijk zouden kunnen beïnvloeden.

Statistieken heb je pas achteraf. Als je wilt voorspellen wat de uitkomst van een spel met bepaalde spelregels zal zijn, dan kun je dit doen met behulp van een model.

- Neem Figuur 1.4 over en pas de percentages met maximaal 5% aan zodanig dat er meer kandidaten zullen winnen, maar de spelshow niet meer geld kwijt is aan de winnaars. Licht je antwoord toe.

## Opdracht 5: Weldoener



Wat zou er gebeuren als we allemaal een beetje weldoener waren en elke dag een euro aan iemand anders zouden geven? Bekijk de simulatie en beantwoord de daar gestelde vragen.

### 1.3 Tijd en iteraties

In de video van de vuurmieren hebben we gezien dat het gedrag van individuele mieren leidt tot collectief gedrag van de mierenkolonie. Dit emergente gedrag van de agents (losse mieren) was het gevolg van simpele gedragsregels, waarbij een mier reageert op zijn omgeving. Deze omgeving van de mieren, ofwel de kolonie, verandert voortdurend van vorm in de loop van de **tijd**. Mieren nemen daarom steeds opnieuw een beslissing over wat ze gaan doen volgens de gedragsregels waarmee ze zijn geprogrammeerd.

Het model *Weldoener* wordt ook in stappen uitgevoerd. Na elke stap (*tick*) kijkt elke mens (agent) of hij geld heeft en als dat zo is doneert hij een eenheid geld aan een ander. Ofwel: de regels van het model worden telkens opnieuw door alle agents uitgevoerd. Eén zo'n stap heet een **iteratie**. Na elke iteratie is het spel in een nieuwe **toestand** en zijn we een stapje of verder in de tijd. De iteratie is de tijdeenheid.

Een model ontwikkelt zich in de tijd, doordat het dezelfde regels keer op keer herhaalt. De uitvoer van een computermodel zal dan ook altijd bestaan uit meerdere iteraties. Na elke iteratie is er een nieuwe toestand. Bij het spel *Helden en Lafaards* heb je dat zelf ervaren.

Het blijkt dat veel processen op grotere schaal te modelleren zijn door ze te beschrijven op basis van het gedrag van kleinere eenheden. Het emergente gedrag is het gevolg van de gedragsregels van de agents: *Agent-based* modeling. Een prachtig voorbeeld hiervan is de voortdurend veranderende vorm van een zwerm spreeuwen. In Figuur 1.6 zie je de toestand van een zwerm spreeuwen op drie opeenvolgende momenten. Dit soort groepsgedrag zie je ook bij andere vogels, maar bijvoorbeeld ook bij scholen vissen.



FIGUUR 1.6

## Opdracht 6: Een zwerm spreeuwen



Bekijk de video van een zwerm spreeuwen.

We willen een model maken van de vorm van een zwerm spreeuwen door het gedrag van individuele spreeuwen te beschrijven. De spreeuwen laten zich beïnvloeden door omgevingsfactoren.

12. Noem minimaal vijf factoren die het gedrag van individuele spreeuwen zouden kunnen beïnvloeden.
13. Welk nut zou een model van een zwerm spreeuwen kunnen hebben?
14. Wat zou voor dit model een geschikte tijdeenheid kunnen zijn? Wat is één iteratie?
15. Wonderbaarlijk genoeg komen de spreeuwen nooit met elkaar in botsing. Bedenk een toepassing waarbij de kennis van de achterliggende mechanismes van dit fenomeen bruikbaar kunnen zijn.

## Opdracht 7: Bosbrand



Bekijk de video van een grote bosbrand. We willen een model maken van de verspreiding van zo'n brand.

16. Wat zijn de agents in zo'n model?
17. Zou *vuur* een agent kunnen zijn in dit model, denk je? Waarom wel / niet?
18. Hoe reageren de agents op hun omgeving? Van welke factoren is hun gedrag afhankelijk?
19. Welk doel zou een model van de verspreiding van een bosbrand kunnen dienen?



## Opdracht 8: Iteraties



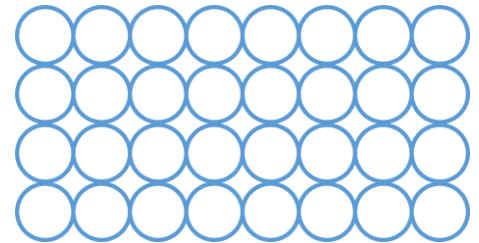
Je onderzoekt het emergente gedrag van een groep agents. Bij deze opdracht hoort een werkblad.

## Opdracht 9: Laterale inhibitie



In de vorige opdracht heb je berekend hoe agents reageren op hun omgeving op basis van slechts een paar regels. Dit soort regels komt vaker voor in de natuur. Ze kennen hele praktische toepassingen.

Het licht dat je via je ogen ontvangt, wordt opgevangen op je netvlies. Het netvlies bestaat uit een hele reeks piepkleine lichtgevoelige cellen (staafjes en kegeltjes) die het licht omzet in een elektrisch signaal dat naar je hersenen gaat. Deze cellen zijn schematisch getekend in Figuur 1.7. Hiermee maken we een vereenvoudigd model van het netvlies.



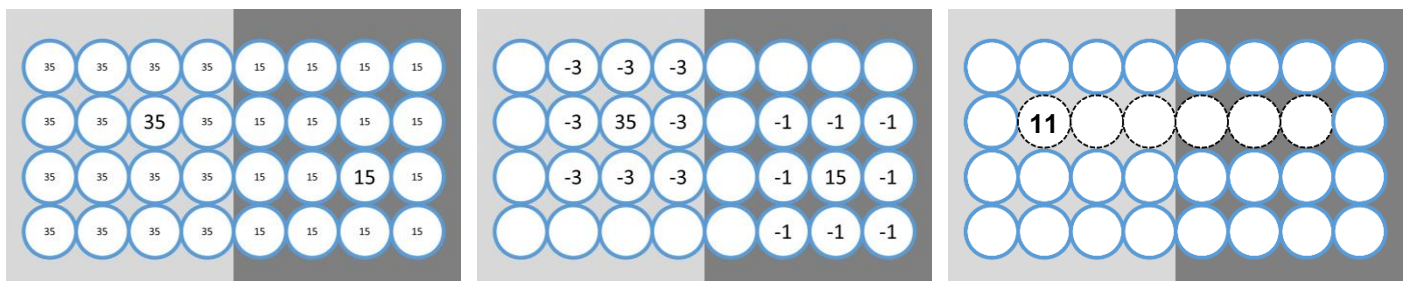
FIGUUR 1.7

Voor de cellen van het netvlies gelden de volgende regels:

- Als er een felle (lichtere) tint op de cel valt, reageert deze door een hoger signaal te geven (A)
- Cellen onderdrukken hun burens. Hoe feller de tint op de cel, des te meer ze hun burens onderdrukken (B)

Een persoon kijkt naar een vlak met twee grijs tinten. De lichtgevoelige cellen reageren op de lichtere tint door een signaal met een sterkte van 35 af te geven. De donkere tint zorgt voor een signaal van 15 (figuur A). Dit komt overeen met de eerste regel.

De cellen op het netvlies zijn met elkaar verbonden door een complex netwerk van zenuwen. Dit stelt ze in staat om het signaal van hun burens te onderdrukken. De cellen links ontvangen veel licht en onderdrukken hun burens door 3 van hun signaal af te trekken. De cellen rechts ontvangen weinig licht en zenden daarom zelf een lager signaal uit. Ook onderdrukken ze hun burens met een afname van slechts 1 (figuur B). Dit is conform de tweede regel.



FIGUUR 1.8

A

B

C

In figuur C is een rij van zes cellen gemarkeerd met een stippellijn. De eerste cel heeft ten gevolge van de twee regels uiteindelijk een uitgangssignaal 11.

20. Toon dit aan met een berekening.

21. Bereken de uitgangssignalen van de overige gemarkeerde cellen.

Het fenomeen dat cellen het signaal van hun burens onderdrukken, heet laterale inhibitie.

22. Bedenk op basis van de uitkomst van de vorige vraag wat het nut is van laterale inhibitie. Figuur 9 geeft hierbij misschien nog een hint. Je ziet twee keer dezelfde twee grijze vlakken!



Het fotobewerkingsprogramma Photoshop kan dit principe gebruiken.

23. Klik op het video-icoon om de demonstratievideo te bekijken.

24. Heb je Photoshop tot je beschikking? Maak dan je eigen *custom filter*.



FIGUUR 1.9

## Opdracht 10: Spinnenwebben

Spinnen weven hun web met spinrag of spinsel. Als eerste maken ze een brug van spinrag tussen twee punten. Afhankelijk van de omgeving, volgt een aantal extra grote lijnen die een basisstructuur vormen. Daarbinnen maakt de spin zijn web. Niet alle soorten doen dat op dezelfde manier. Wij bekijken ronde webben, zoals bijvoorbeeld kruisspinnen die maken (Figuur 1.10).



FIGUUR 1.10

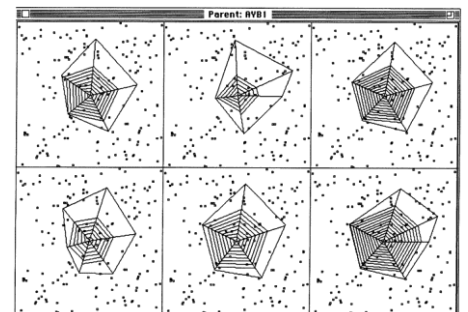
De vorm komt je vast bekend voor, maar waarom hebben spinnenwebben deze vorm en niet een andere vorm? En hoe weet een spin dat het effect zal hebben, wanneer hij zijn web op deze manier weeft? Het korte antwoord op die laatste vraag is dat de spin dat niet weet. Het antwoord op de vraag over de vorm kan gegeven worden met behulp van een model.

In zijn boek *Het toppunt van onwaarschijnlijkheid* (Engels: *Climbing Mount Improbable*) beschrijft de Britse evolutiebioloog Richard Dawkins een computermodel dat spinnen een web laat weven in meerdere iteraties. Het 2D-ontwerp van het spinnenweb ontwikkelt zich elke iteratie op basis van een beperkt aantal regels waarmee de spin genetisch is geprogrammeerd, net als de vuurmieren uit paragraaf 1.1.

Als een insect in een web vliegt, zit hij in de val, omdat hij blijft plakken aan het spinrag. Het model simuleert de plaats waar insecten door het oppervlak van het web vliegen en het aantal insecten dat langs komt. Een cruciale factor hierbij is willekeur: de plaats en het aantal zijn niet elke keer hetzelfde, maar *random*. Maar ook het ontwerp van de spinnenwebben is willekeurig. Spinnen erven een deel van hun bouwtechnieken van hun ouders, maar bij de voortplanting ontstaan kleine variaties of mutaties, waardoor spinnen anders worden geprogrammeerd en hun eigen web er net anders uit kan gaan zien dan dat van hun ouders.

25. Leg uit dat het afhangt van de vorm van het web of een spin zich zal kunnen voortplanten.
26. Gebruik de term *random* of *willekeurig* om uit te leggen dat een spin met een goed ontworpen web zich soms toch niet zal overleven om zich voort te planten.

In Figuur 1.11 zie je spinnenwebben uit het computermodel. Linksboven is het web van een ouder. De overige vijf webben zijn van kinderen van deze ouder. Ze zijn verschillend, want door de toeval zijn er kleine aanpassingen in de manier waarop een spin genetisch geprogrammeerd is om het web te weven. De stippen in Figuur 1.11 zijn de insecten die in het model in de buurt van het web komen.



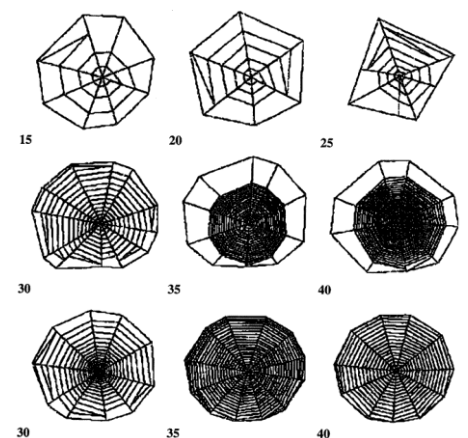
FIGUUR 1.11

27. Hoe zie je aan de stippen dat deze *random* gemodelleerd zijn?
28. Wat is de betekenis van één iteratie in dit model?
29. In het model wordt de ontwikkeling van een populatie spinnen gemodelleerd. Leg uit waarom het noodzakelijk is om met een populatie te werken. Waarom is één spin die zich in het model voortplant niet genoeg?



In een interactief college in de jaren 90 legt Richard Dawkins uit hoe het model van de ontwikkelingen van spinnenwebben de theorie van natuurlijke selectie (evolutie) ondersteunt.

30. Bekijk de eerste zes en een halve minuut van de video.
31. Hoe bepaalt het computermodel het succes van het ontwerp van een spinnenweb? Dawkins noemt twee factoren.
32. Figuur 1.12 toont de ontwikkeling van het computerweb met stapjes van vijf generaties. Hoe kunnen de modelmakers vaststellen dat hun model een realistische simulatie van de werkelijkheid is?
33. Leg uit dat dit soort onderzoek moeilijk door middel van waarneming uit te voeren is.



FIGUUR 1.12

## 1.4 Het doel van modelleren

In de wetenschap, maar ook bij bedrijven en in de sport wordt steeds meer gebruik gemaakt van modellen. Waarom doen we dat? Het verhaal van de spinnenwebben in de vorige opdracht geeft hierop al meerdere antwoorden:

- het model geeft een manier om de werkelijkheid te **beschrijven**
- hiermee kunnen we de ontwikkeling van spinnenwebben **uitleggen** of **verklaren**
- in de video wordt het model gebruikt voor een college. Dit heeft als doel **onderwijs** of **educatie**
- met het model kun je eenvoudig nieuwe situaties proberen: je kunt **experimenteren**
- op basis van de resultaten van een model kun je gaan **discussiëren** en **voorspellen**

In het model van de spinnenwebben was sprake van **toeval** ofwel **random** gedrag. Dit zijn belangrijke begrippen als je gaat modelleren, omdat veel fenomenen die we kunnen modelleren die willekeur bevatten. Ze gaan nu eenmaal niet altijd precies op dezelfde manier. Dat noemen we **niet-deterministisch**. De willekeur in het model zit ten eerste in de insecten die in willekeurige hoeveelheden op willekeurige plaatsen langs en in het spinnenweb komen. Ten tweede zit er willekeur in de manier waarop een nieuwe generatie spinnen genetisch wordt geprogrammeerd om een web te weven. Een spin erft veel van die regels van zijn voorouders, maar door mutaties worden die regels een klein beetje random gewijzigd. Op die manier kan worden verklaard dat de vorm van de spinnenwebben in de loop van de tijd verandert.

### Opdracht 11: Mensenstroom



Bekijk de video waarin wordt gemodelleerd hoe een groep mensen zich gedraagt wanneer een groot stadion in Sint-Petersburg (Rusland) moet worden geëvacueerd. De getoonde simulaties zijn gemaakt, nog voordat het stadion (figuur 1.13) in 2017 werd geopend.

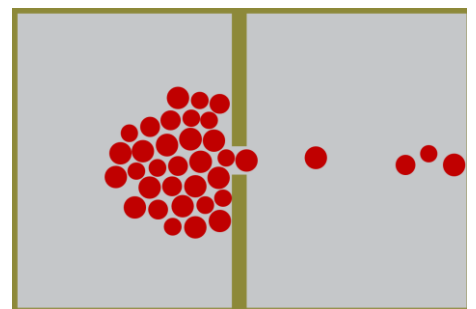


FIGUUR 1.13

34. In de theorie wordt een aantal mogelijke doelen van modelleren beschreven. Welke doelen zijn volgens jou van toepassing op deze situatie. Geef bij elk gekozen doel een toelichting.
35. In de video worden meerdere evacuatieplannen gesimuleerd. Wat is hiervoor de reden?
36. Wat zijn de agents in dit model?
37. Noem vijf factoren die het gedrag van de agents (mede) zullen bepalen.

Een voetbalstadion voor bijna 70 duizend toeschouwers is een hele ingewikkelde omgeving om te modelleren. In modellen wordt een situatie vaak vereenvoudigd door de omgeving te versimpelen en het aantal gedragsregels te beperken.

In figuur 1.14 zie je een beeld van zo'n versimpeld, abstract model van een ruimte. Het model simuleert een groep mensen die de ruimte (links) zo snel mogelijk wil verlaten, vanwege rookontwikkeling. Er is maar één opening (midden). Omdat iedereen snel weg wil, ontstaat een opstopping. Die is niet goed voor de totale ontruimingstijd.



FIGUUR 1.14

38. Bedenk minimaal drie omgevingsfactoren waar de totale ontruimingstijd van afhangt.
39. Bedenk drie onderzoeksvragen over de ontruimingstijd die je bij dit model zou kunnen stellen.
40. Voorspel wat de antwoorden op jouw eigen onderzoeksvragen zullen zijn.
41. Het model van figuur 1.14 is heel erg versimpeld. Mensen worden getekend als rode bolletjes. Hoe zie je dat rekening gehouden is met het feit dat mensen niet allemaal even groot zijn?
42. Bedenk twee manieren waarop de modelmakers willekeur of random gedrag in het model zouden kunnen hebben ingebouwd.



Hoe bepaalt de indeling van een lokaal de snelheid van de ontruiming? In de simulatie bij deze opgave kunnen we dit voor verschillende klasopstellingen vergelijken.

43. Bouw jullie eigen klasopstelling na en vergelijk de ontruimingstijd met de opstellingen in het model.



## Opdracht 12: Kiezen I



Bekijk de video over het voorspellen van menselijk keuzegedrag bij verkiezingen. Hierbij wordt onder meer iets verteld over het gebruik van data en modellen tijdens de verkiezingsstrijd tussen Donald Trump en Hillary Clinton (figuur 1.15).

In de eerste minuten van de video wordt verteld dat er op basis van algoritmes wordt voorspelt wie binnenkort een nieuwe auto zal gaan kopen of wie fraude zal gaan plegen. Om dit te voorspellen gebruikt het model gegevens of data.



FIGUUR 1.15

44. Bedenk vijf persoonlijke gegevens die je zou kunnen gebruiken om te voorspellen of iemand binnenkort een nieuwe auto zal gaan kopen.
45. De uitkomst van de algoritmes zijn *niet-deterministisch*. Leg dit uit.
46. Welke reden geeft de onderzoekster (in de tweede minuut van de video) voor haar onderzoek naar de vraag wie er kans maakt om in de bijstand terecht te komen?
47. De campagnestrategie zegt in de derde minuut: *alles wordt met alles vergeleken en berekend*. Geef jouw mening over deze uitspraak.
48. In de vierde minuut wordt verteld op welke manier er profielen worden opgesteld van potentiële kiezers. Op welke manier worden deze gegevens gebruikt om de verkiezingsuitslag te beïnvloeden?
49. Wat is *microtargeting*?
50. Welke tactieken zijn door het Trump-campagneteam gebruikt om kiezers niet op de concurrent Clinton te laten stemmen?
51. Vind jij jezelf voorspelbaar? Waarom? Ben je makkelijk te manipuleren, denk je?

We willen met een sterk versimpeld model modelleren hoe een groep mensen elkaar kan beïnvloeden. Hiervoor maken we een ruimte met 100 mensen. De helft van de mensen krijgt de politieke voorkeur blauw, de andere helft de voorkeur geel, vergelijkbaar met *Democraat* of *Republikein*. De mensen worden over de ruimte verspreid. We gaan onderzoeken hoe mensen die naast elkaar staan elkaar kunnen beïnvloeden.

52. Deze verdeling van 50-50 is precies bepaald en dus niet willekeurig. Leg uit hoe je ondanks dit gegeven toch een random verdeling kunt krijgen.

De agents in dit model zijn de mensen. Ze krijgen twee eigenschappen die in grootte kunnen variëren:

- overredingskracht: hoe goed is iemand in staat om een ander met argumenten te overtuigen van het feit dat zijn politieke voorkeur de juiste is?
- vasthoudendheid: hoeveel is er voor nodig om iemand anders van mening te doen veranderen? Hoe overtuigd zijn ze van hun eigen gelijk?

Bij agent-based modeling vertonen agents hun gedrag op basis van een beperkt aantal simpele regels. De agents reageren hierbij op hun omgeving.

53. Wat is in dit model de omgeving?
54. Bedenk een gedragsregel: op basis waarvan kan de politieke voorkeur van een agent veranderen?
55. Wat zou in dit model een iteratie kunnen zijn?

## Opdracht 13: Kiezen II



Op basis van een model onderzoek je hoe de politieke voorkeur van mensen kan worden beïnvloed door hun directe omgeving. Agents laten zich beïnvloeden door de overtuigingskracht van nabije agents. Als die overtuigingskracht groter is dan hun eigen vasthoudendheid, kunnen ze van politieke voorkeur wisselen.



Bij deze opgave hoort een werkblad.

-1	0	-2	1	0
-2	3	-3	5	3
-2	2	0	0	-1
-2	7	-3	1	-1
-1	0	0	1	0
-1	2	-3	2	4
-1	2	-2	1	0
-3	5	-5	3	-2

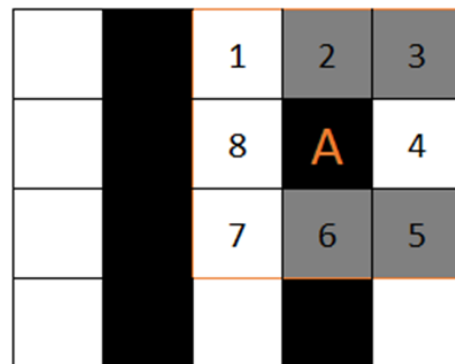
FIGUUR 1.16

## Opdracht 14: Cellulaire automaten



Bij opdracht 8 (iteraties) en opdracht 13 (politieke voorkeur) heb je gewerkt met een abstracte wereld van agents in de vorm van vierkantjes. Agents veranderen van kleur op basis van een aantal eenvoudige gedragsregels, waarbij ze reageren op hun omgeving. Die omgeving bestaat uit acht omringende agents (zie Figuur 1.17).

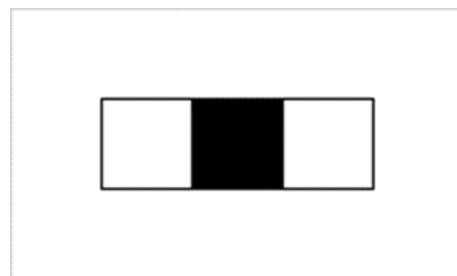
Als je de opdracht 8 en 12 hebt gemaakt heb je gemerkt dat het, zelfs met maar een paar gedragsregels en eigenschappen, al snel ingewikkeld wordt om te bepalen of voorspellen of een agent van kleur zal wisselen. Het emergente gedrag van alle agents samen – het totale patroon – is al helemaal niet te voorspellen. Daarom gebruiken we vanaf hoofdstuk 2 de computer om dit voor ons door te doen.



FIGUUR 1.17

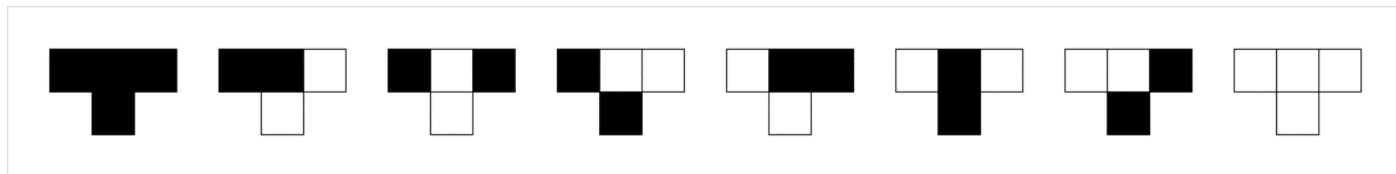
De modellen die we in opdracht 8 en 12 hebben bekeken zijn voorbeelden van cellulaire automaten. Een cellulaire automaat bestaat standaard uit een raster van cellen (agents) die zich in een beperkt aantal toestanden (meestal kleuren) kunnen bevinden. Door het toepassen van een aantal gedragsregels die betrekking hebben op de toestand van hun burens, kan de toestand van de cel veranderen.

In de meest elementaire vorm van een cellulaire automaat stellen we ons een cel in één dimensie voor met slechts twee burens zoals in Figuur 1.18. De cel is zelf zwart (waarde 1) en zijn burens zijn allebei wit (waarde 0).



FIGUUR 1.18

In Figuur 1.19 zie je dat er nu maximaal  $2^3 = 8$  verschillende mogelijkheden zijn voor de drie cellen. We willen nu dat de cellen of agents gaan reageren op hun omgeving op basis van regels. Omdat er acht verschillende combinaties van de drie cellen mogelijk zijn, moeten we die voor alle acht gevallen beschrijven. Zie Figuur 1.19.



FIGUUR 1.19

In de figuur zie je in de bovenste rij de acht mogelijke combinaties van de cel met zijn twee burens. In de rij eronder staat hoe de cel in een volgende iteratie moet kleuren op basis van de huidige combinatie.

56. De acht combinaties zijn (van rechts naar links) heel bewust in een bepaalde volgorde getekend.

Leg dit uit aan de hand van jouw kennis over binaire getallen.

57. Als je in de onderste rij voor een zwarte cel '1' invult en voor witte cel '0', dan ontstaat 10010110.

Leg uit dat de situatie in Figuur 1.19 'regel 150' wordt genoemd.



Met behulp van een werkblad in Excel gaan we kijken welke patronen er ontstaan na een aantal iteraties.

58. Gebruik het Excel-werkblad om regel 150 voor een aantal opeenvolgende iteraties uit te werken, door de achtergrondkleur van de cellen waar nodig in zwart te veranderen.

59. Ga naar het tabblad met de naam *regel 57* en vul bovenaan (in rij drie de regels) aan door de juiste vakjes zwart op te vullen. Vul daarna vanaf regel 6 de vakjes aan voor een aantal iteraties.



Als je het patroon van vele iteraties wilt bekijken, kun je beter de computer laten tekenen.

60. Gebruik de link om regel 57 door de computer uit te laten voeren. Bekijk het patroon dat ontstaat.

61. Bekijk de regels 30, 45 en 225.

62. Gebruik het tabblad *eigen regel* in Excel om zelf een regel te ontwerpen en teken een paar iteraties bij je eigen regel. Laat jouw regel daarna online uitvoeren voor een groot aantal iteraties.

## Opdracht 15: Game of life



Bekijk de video waarin een cellulaire automaat (zie vorige opgave) is gemaakt op basis van een aantal simpele regels die bekend staan onder de naam *Game of life*. Het is bedacht door de Britse wiskundige John Conway.

63. Gebruik internet om te onderzoeken op basis van welke simpele regels de agents zich gedragen.



Met de paar regels paar regels uit de vorige vraag kan verrassend complex emergent gedrag worden bereikt, waarbij vormen zoals die in Figuur 1.20 *tot leven* komen.

64. Open de simulatie bij deze opgave en probeer de mogelijkheden van de simulatie zelf te ontdekken.  
65. Selecteer in het dropdown-menu achtereenvolgens *Glider*, *Exploder* en *10 Cell Row* en bekijk het resultaat.

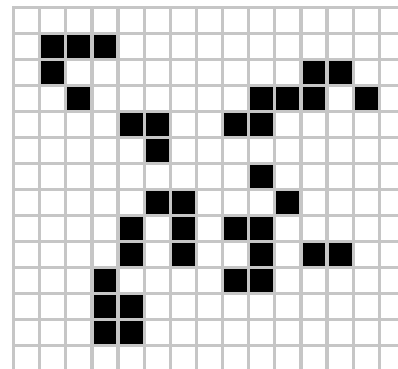


Er is veel onderzoek gedaan naar de *Game of Life* en vergelijkbare cellulaire automaten. Ook is er een aparte wiki-pagina aangemaakt waar veel informatie en voorbeelden te vinden zijn.

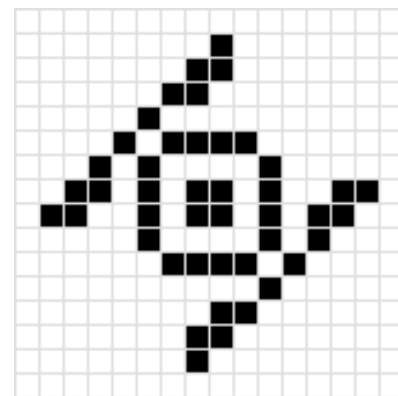
66. Klik op de link om naar de wiki-pagina te gaan. Wat is een *still life*? En wat is een *oscillator*?

In de simulatie kun je eigen vormen maken door op cellen te klikken.

67. Kies in het dropdown-menu voor *clear* en bouw vervolgens Figuur 1.20 na. Klik op *Start* om het resultaat te bekijken.  
68. Doe hetzelfde voor figuur 21.



FIGUUR 1.20



FIGUUR 1.21

## Opdracht 16: Verspreiding van HIV



Bij deze opdracht onderzoek je de verspreiding van het HIV-virus door onveilige seks. Jouw klasgenoten en jij zoeken contact en hebben 'gemeenschap'. De spelregels krijg je van je leraar.

### 1.5 Onderzoek doen

We hebben inmiddels nagedacht over een groot aantal modellen over de natuur (b.v. weer, bosbrand), dieren (b.v. vuurmieren, spreeuwen) en dierlijke gedragingen (netvlies, spinnenweb), menselijk gedrag (delen of stelen, vluchtgedrag, kiesgedrag) en een aantal abstracte modellen (cellulaire automaten, Game of Life). Ook hebben we een aantal situaties gesimuleerd (Helden en Lafaards, Weldoener). In alle gevallen was er sprake van gedrag van agents volgens een paar gedragsregels en konden we emergent gedrag van een groep agents waarnemen.

In de vorige paragraaf hebben we doelen van modellen benoemd. Maar hoe weet je nu dat het gedrag van een model klopt? Dat is best een moeilijke vraag. Het model dat de ontwikkeling van spinnenwebben modelleerde, voorspelt spinnenwebben die we ook in het echt in de natuur zien. Dat is een sterk argument in het voordeel van het model. Maar betekent dit ook dat de ontwikkeling van de vorm van een spinnenweb over miljoenen jaren net zo gaat als het model voorspelt?

Dit zijn vragen die je jezelf pas kunt stellen, nadat je een model hebt gemaakt en uitgevoerd, zodat je modelresultaten hebt. Vaak levert dit op dat je daarna je model verder wilt aanpassen of verfijnen. Voor je zover bent, moet je een aantal andere stappen doorlopen. De stappen om onderzoek te doen met behulp van een model worden op een rij gezet in de **modelleercyclus** met vijf fasen.

We beschrijven de modelleercyclus aan de hand van de *Mexican wave* (figuur 1.22). Volgens Wikipedia is dit *een gecontroleerde golfbeweging in een grote mensenmassa, die ontstaat wanneer groepen mensen beurtelings opstaan, vaak met de armen in de lucht, en weer gaan zitten.*

### FASE 1 definiëren

Een logische eerste stap is dat je beschrijft wat je wilt onderzoeken met het model. We hebben gekozen voor de *Mexican wave*, maar bij dit fenomeen kun je jezelf nog vele vragen stellen, zoals *hoe ontstaat een wave of hoe snel beweegt een Mexican wave door het stadion?* Perk je onderzoek in tot één concrete vraag: uitbreiden kan altijd nog!



FIGUUR 1.22

Het is noodzakelijk om je af te vragen of het fenomeen dat je wilt onderzoeken wel past bij *agent-based modeling*. Dat is het geval wanneer er groep agents aan te wijzen is die individueel op elkaar en hun omgeving reageert. Het emergente gedrag van de groep is of lijkt hierbij afhankelijk te zijn van het gedrag van de agents en ontwikkelt zich in de tijd. Onze *Mexican wave* lijkt aan deze eisen te voldoen.

Wij kiezen voor de **onderzoeksvraag** *hoe snel beweegt een Mexican wave door het stadion?* Aan deze onderzoeksvraag kun je ook een **hypothese** (voorspelling) en een **doel** verbinden.

### FASE 2 conceptualiseren

Een model simuleert meestal een extreme versimpeling van de werkelijkheid. In de opdracht over de *mensenstroom* (in een voetbalstadion bij een evacuatie) zien we individuele mensen als bolletjes van verschillende grootte die door de ruimte bewegen. Zo'n versimpeling, waarbij we kiezen wat wel en niet meedoet in het model, wordt **abstractie** genoemd. Je beslist nu: wat is nuttig voor het model en wat niet?

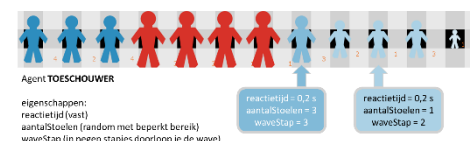
Door te versimpelen ontstaat een conceptueel model, dat we kunnen weergeven in de vorm van een tekst of een tekening. Het is een basale beschrijving van de echte wereld, waarbij je al rekening houdt met de modeltechnieken die je in fase 3 gaat gebruiken. Hierbij moet je vragen beantwoorden zoals:

- Wat zijn de agents in dit model? (Zijn ze zelfstandig?)
- Welke **eigenschappen** en welk gedrag hebben de agents en wat is daarvan van belang voor de onderzoeksvraag?
- Hoe **reageren** de agents op hun omgeving? Hoe worden ze beïnvloed?
- Wat is een **iteratie** in dit model? Wat gebeurt er in een iteratie en in welke volgorde?

In de opdracht over *kiezen* (tijdens verkiezingen) blijft er van mensen niet meer over dan een cel (vierkantje) die van kleur verandert. De enige eigenschappen in het model zijn *politieke voorkeur*, *overtuigingskracht* en *vasthoudendheid*. Blijkbaar vond de modelmaker eigenschappen als *geslacht* en *leeftijd* niet van belang of vond hij dat deze indirect terugkwamen in de andere eigenschappen. Dat wil niet zeggen dat deze eigenschappen in werkelijkheid niet van belang zijn! Maar in deze fase weet je dat niet: je bent immers onderzoek aan het doen. In het algemeen begin je simpel: uitbreiden kan altijd nog!

Bij ons model van de *Mexican wave* ligt de keuze voor agents voor de hand: individuele toeschouwers. We gaan er vanuit dat de agents reageren op andere agents. We kiezen de eigenschap *reactietijd*; deze geven we in eerste instantie een vaste waarde. Een mogelijke uitbreiding van ons model zou kunnen zijn dat we dit persoonsafhankelijk (random) maken.

Op wie reageren de agents nu precies? Op hun directe burens? Of kijken ze twee of drie stoelen verderop of nog veel verder? We gaan ervan uit dat dit per agent varieert en nemen dit op in de eigenschap *aantalstoelen* die we random instellen. Verder versimpelen we het stadion tot één rij mensen op een vaste onderlinge afstand die er allemaal even lang over doen om te gaan staan en zitten.



FIGUUR 1.23

In de volgende paragraaf gaan we verder met de beschrijving van de modelleercyclus.

## Opdracht 17: Mexican wave I



Bekijk de video van een *Mexican wave* in een voetbalstadion.

69. Definieer twee onderzoeksvragen (anders dan in § 1.4) met betrekking tot de *Mexican wave*.
70. Maak bij beide onderzoeksvragen een hypothese: wat verwacht je qua uitkomst?

In de vorige paragraaf is de volgende onderzoeksvraag gesteld:  
*Hoe snel beweegt een Mexican wave door het stadion?*

Op basis van de video kunnen we een schatting maken van de uitkomst, zodat we in onze hypothese een getalswaarde kunnen noemen.

71. Bestudeer de video. Op basis van welke gegevens kun je een onderbouwde schatting doen van de snelheid waarmee de wave door het stadion beweegt?
72. Gebruik de gegevens uit de vorige opdracht om een hypothese te formuleren met behulp van een schatting op basis van de gegevens uit de vorige vraag.
73. In de theorie zijn in fase 2 (conceptualisatie) meerdere keuzes gemaakt die vallen onder abstractie. Benoem minimaal vijf van deze keuzes. Gebruik hierbij eventueel figuur 1.23.

## Opdracht 18: Agressie



Bekijk de video over het gebruik van modellen door de politie. In Figuur 1.24 zie je een scherm uit één van de gebruikte modellen.

74. In de video wordt gesproken over *big data*. Wat wordt daarmee bedoeld?

Vanaf 2:20 in de video vertelt de medewerker dat de politie in staat is om een vechtpartij te voorspellen op basis van computermodellen.

75. Is het gebruikte model een voorbeeld van agent-based modeling? Leg uit waarom jij vindt dat dit wel of niet zo is.

De context *agressie van jongeren in het uitgaansleven* kan wel degelijk met agent-based modeling worden gemodelleerd. Om tot een conceptueel model te komen, beantwoorden we de volgende vragen.

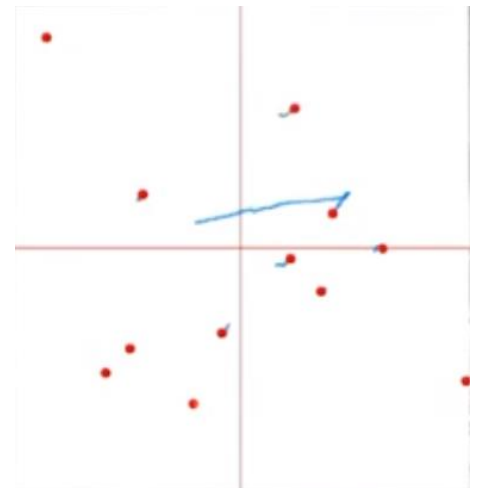
76. Wat zijn de agents in het model?
77. In Figuur 1.24 zie je rode bolletjes en blauwe strepen. Leg van beide uit wat hun betekenis is.
78. Het beeld van Figuur 1.24 is een abstract beeld. Wat wordt er bedoeld met *abstractie*?
79. Welke eigenschappen zijn voor het model van belang?  
HINT: vanaf 3:50 worden een aantal factoren genoemd die door de politie worden gebruikt.
80. Leg van elk van de door jou genoemde factoren bij de vorige vraag uit welke invloed deze heeft op het gedrag van de agent.
81. Bedenk bij elk van de door jou genoemde factoren een onderzoeksvraag.

Vanaf 4:50 wordt gesproken over persoonsgegevens die in een (ander) model worden gestopt. Dit model kan gaan helpen bij de opsporing van mensen die een strafbaar feit hebben gepleegd.

82. Is dit model een voorbeeld van agent-based modeling? Waarom wel / niet?

Vanaf 6:00 wordt gesproken over het problemen die kunnen ontstaan als de modelmaker bepaalde vooroordelen heeft. Dat probleem zou zich ook kunnen voordoen in ons agressie-model.

83. Noem een voorbeeld van een eigenschap van een agent of van agent-gedrag dat op een vooroordeel gebaseerd zou zijn.



FIGUUR 1.24



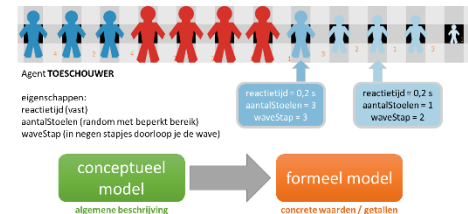
## 1.6 De volledige modelleercyclus

In de vorige paragraaf hebben we de eerste fasen van de modelleercyclus bekeken aan de hand van de casus *Mexican Wave* en gezien wat er nodig is om via definitie en vraagstelling tot een conceptueel model te komen. Welke stappen doe je daarna?

### FASE 3 formaliseren

Modelleren doe je met de computer. Van ons conceptuele model van de *Mexican Wave* moeten we daarom naar een model waarin alles precies (eenduidig) is omschreven. Dit is de fase van systeemontwikkeling. Ons eindresultaat is een formeel model, zoals een wiskundige formules of een computerprogramma. Hoe je dat zelf doet, bekijken we in hoofdstuk 2.

Om te kunnen rekenen heeft een computer getallen en regels nodig. Aan de agent-eigenschappen *reactietijd* en *aantalstoelen* moeten we dus waarden gaan toekennen. De *reactietijd* geven we een vaste waarde van 0,2 s (200 milliseconde). Voor de eigenschap *aantalstoelen* laten we de computer willekeurig kiezen tussen 1 en 5. Bij het maken van de wave-beweging kiezen we ervoor om de beweging in negen stapjes (*waveStep*) op te delen die allemaal even lang duren (namelijk: 1 iteratie). Zie figuur 1.25.



FIGUUR 1.25

Bij het kiezen van deze waarden kun je gebruik maken van eigen ervaringen, maar ook van bronnen. In ons geval is de reactietijd op basis van een bron. Voor het aantal stoelen geldt: we weten het niet, maar we kunnen het later aanpassen als we zien welke invloed dit heeft op de uitkomst. Iets vergelijkbaars geldt voor de beweging. Het is een versimpeling waarvan we moeten ontdekken of hij gerechtvaardigd is.

Daarom controleer je na het bouwen de werking van het model. Dat doe je door **verificatie** en **validatie**. Bij verificatie check je of het model wel voldoet aan de omschrijving zoals jij die had bedacht: klopt de uitkomst van het model met wat je erin gestopt hebt? Gedragen de agents zich zoals jij het had bedoeld? Klopt het met ons eigen conceptuele model?

Dat het model een resultaat geeft, betekent nog niet dat die uitkomst klopt met de werkelijkheid. Daarom moeten we het model valideren. Dit doe je door de modelresultaten te vergelijken met wat je weet of met wat bronnen er over vertellen. Dat vergelijken doe je op twee niveaus.

Als je controleert of de agents zich gedragen zoals verwacht, doe je aan **microvalidatie**. Bij **macrovalidatie** kijk je of het hele systeem het gedrag vertoont dat je verwacht. In ons geval zou je bijvoorbeeld kunnen kijken naar een video van een *Mexican wave*. Hoe breed is het stadion? Hoe snel gaat de wave door het stadion? Lijkt de door jou gemodelleerde wave op die in de video? Soms is er al iemand die hier onderzoek naar heeft gedaan. In dat geval kun je die resultaten vergelijken met jouw model.

Voor zowel de verificatie als de validatie is het belangrijk dat je het model meer dan één keer uitvoert, bijvoorbeeld omdat we toeval (random waarden) in de eigenschappen hebben gestopt. Onthoud de regel: *one run is no run!*

### FASE 4 experimenteren

Nadat het model geverifieerd en gevalideerd is, kunnen we experimenteren. Experimenteren is dus niet het voor het eerst uitvoeren van je model! Het is verder onderzoek doen als je kritisch naar de werking van je eigen model hebt gekeken en hebt beslist dat het model in eerste instantie *af* is. Natuurlijk weet je daarbij niet altijd 100% zeker dat je model voldoet, ook al heb je de verificatie en validatie zorgvuldig gedaan. Maar als het model realistische uitkomsten geeft voor bekende situaties, is dat een goede basis om er iets nieuws mee te voorspellen.

### FASE 5 analyseren

De uitkomsten van jouw model zijn in de vorm van bijvoorbeeld getallen, grafieken, plaatjes of animaties. Jij moet daar zelf een betekenis aangeven. Die uitleg van de resultaten van het model heet de interpretatie. Jouw analyse levert het uiteindelijke resultaat van jouw onderzoek en een antwoord op de onderzoeksvraag.

## De hele cyclus en reflectie

In Figuur 1.26 staan alle vijf fasen uit de modelleercyclus nog eens op een rij. Ze zijn bewust in een cirkel (cyclisch) weergegeven. In het kort kunnen we de modelleercyclus als volgt samenvatten:

- Definieren: het probleem wordt beschreven in context; vragen worden geformuleerd.
- Conceptualiseren: de context wordt vertaald naar een abstract model door agents aan te wijzen en te bepalen welke factoren uit de echte wereld worden meegenomen en welke niet.
- Formaliseren: het conceptuele model wordt omgezet (geprogrammeerd) naar een computermodel (formeel model) dat wordt geverifieerd en gevalideerd.
- Experimenteren: het model wordt gebruikt om de onderzoeksvraag te beantwoorden.
- Analyseren: de modelresultaten worden geïnterpreteerd en vertaald naar conclusies in de echte wereld.



FIGUUR 1.26

De analyse van de uitkomsten van een experiment geeft vaak aanleiding tot nieuwe onderzoeksvragen. Voorbeeld: *wat is de invloed van een onder- of bovenliggende rij toeschouwers?* Zo'n vraag zorgt ervoor dat het conceptuele model en het formele model weer moeten worden aangepast met bijvoorbeeld nieuwe eigenschappen van de agents. Daarna moet opnieuw verificatie en validatie plaatsvinden, voordat opnieuw kan worden geëxperimenteerd.

Je doet er goed aan om simpel te beginnen qua onderzoeksvraag en model. Nadat je de cyclus hebt doorlopen, kun je langzaam toewerken naar moeilijkere vragen die alleen met een ingewikkelder model te beantwoorden zijn.

Cruciaal tijdens de hele cyclus is de **reflectie**. In elke fase moet je jezelf vragen stellen zoals: *Gaat het goed? Klopt het nog? Waar kan het beter?* Die reflectie zit deels in de verificatie en validatie, maar dat doe je pas als je een computermodel hebt gemaakt. *Zijn de agents achteraf gezien goed gekozen? Is er te veel versimpeld waardoor belangrijke eigenschappen van agents buiten beeld zijn gebleven?* Reflectie levert nieuwe vragen en wensen, maar ook nieuwe kennis.

## Opdracht 19 Mexican wave II



Een modelmaker heeft een formeel model gemaakt voor een *Mexican wave*. Daarbij heeft hij de omschrijvingen uit de vorige twee paragrafen gevolgd en een aantal toevoegingen gedaan, zodat de onderzoeksvraag *hoe snel beweegt een Mexican wave door het stadion?* Met het model kan worden beantwoord.

84. Bekijk het model bij deze opgave en voer de daar getoonde opdrachten uit.

85. Stel dat je bij de verificatie op iets stuit dat niet overeenkomt met het conceptuele model dat je hebt opgesteld. Heeft het dan nog zin om te valideren? Waarom wel / niet?

## Opdracht 20 Mexican wave III



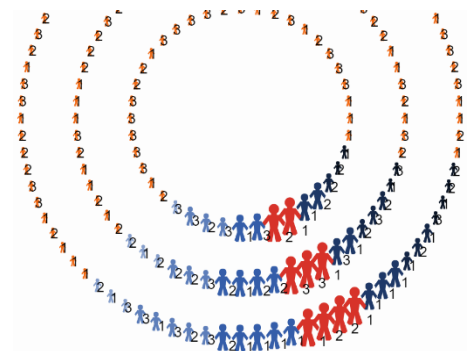
Een modelmaker heeft een formeel model gemaakt voor een *Mexican wave*. Daarbij heeft zij een aantal aanpassingen gedaan ten opzichte van de versie uit de vorige opdracht, zodat een rond stadion ontstaat.

86. Bekijk het model bij deze opgave en voer de daar getoonde opdrachten uit.

Onze onderzoeksvraag bij deze casus luidde:

*Hoe snel beweegt een Mexican wave door het stadion?*

87. Wat vind je na het maken van deze opdracht van de formulering van deze vraag?



FIGUUR 1.27

# BRONNEN

## Algemeen

Voor deze module is gebruikt van het programma NetLogo, door Uri Wilensky. Het programma is te downloaden via: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo>

Veel afbeeldingen zijn screenshots uit dit programma. Het copyright van de gebruikte code is, waar dit relevant is, weergegeven in het meegeleverde NetLogo-bestand.

Bij opdracht 15 is gebruik gemaakt van de broncode van <https://playgameoflife.com>, ontwikkeld en beschikbaar gesteld door Edwin Martin.

Het SLO heeft zijn uiterste best gedaan om de auteursrechten te regelen van alle in deze module gebruikte informatie, zoals teksten, afbeeldingen en videofragmenten, en heeft toestemming gevraagd voor gebruik van dit materiaal voor deze module. Een ieder die zich niettemin eigenaar weet van dergelijk materiaal zonder dat direct of indirect met hem of haar afspraken zijn gemaakt, verzoeken wij contact op te nemen met het SLO.

## Hoofdstuk 1

1.1	CCO	KNMI	<a href="https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/ijzel-begin-januari-2016">https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/ijzel-begin-januari-2016</a>
1.2	public domain	Stephen Ausmus	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fire_ants_01.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fire_ants_01.jpg</a>
1.3	fair use	Endemol	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/File:Golden_Balls.jpg">https://en.wikipedia.org/wiki/File:Golden_Balls.jpg</a>
1.4	-		
1.5	-		
1.6	permission	Tony Armstrong	<a href="https://secure.flickr.com/photos/tonyarmstrong/5410661753/sizes/l">https://secure.flickr.com/photos/tonyarmstrong/5410661753/sizes/l</a>
1.7	-		
1.8	-		
1.9	-		
1.10	permission	René van der Veen	
1.11	permission	Fritz Vollrath & Richard Dawkins	Climbing mount improbable ISBN 0-14-017918-6
1.12	permission	Fritz Vollrath & Richard Dawkins	Climbing mount improbable ISBN 0-14-017918-6
1.13	CC BY-SA 4.0	Andrew Shiva	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RUS-2016-Aerial-SPB-Krestovsky_Stadium_01.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RUS-2016-Aerial-SPB-Krestovsky_Stadium_01.jpg</a>
1.14	-		
1.15	CC BY-SA 4.0	Michael Vadon & Gage Skidmore	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trump_%26_Clinton.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trump_%26_Clinton.jpg</a>
1.16	-		
1.17	-		
1.18	-		
1.19	-		
1.20	-		
1.21	-		
1.22	CC BY-SA 2.0	Naparazzi	<a href="https://www.flickr.com/photos/naparazzi/2984375333">https://www.flickr.com/photos/naparazzi/2984375333</a>
1.23	-		
1.24		AvroTros EenVandaag	<a href="https://eenvandaag.avrotros.nl/item/de-voorspelbare-mens-2-big-brother-en-criminaliteit-1">https://eenvandaag.avrotros.nl/item/de-voorspelbare-mens-2-big-brother-en-criminaliteit-1</a>
1.25	-		
1.26	-		
1.27	-		
1.28	-		

# INDEX

abstractie, 12  
agents, 3, 4  
**analyseren**, 14  
cellulaire automaat, 10  
**conceptualiseren**, 12  
**definiëren**, 12  
doel, 12  
eigenschappen, 12  
emergent gedrag, 3  
**experimenteren**, 14  
**formaliseren**, 14  
groepsgedrag, 3  
hypothese, 12  
iteratie, 5, 12  
macrovalidatie, 14  
microvalidatie, 14  
model, 3  
modelleercyclus, 11, 12  
niet-deterministisch, 8  
omgeving, 3, 5  
onderzoeksvraag, 12  
random, 8  
reageren, 3  
reflectie, 15  
regels, 3  
tijd, 5  
toestand, 5  
toeval, 7, 8  
validatie, 14  
verificatie, 14