

Simulatie

De immense rekenkracht van computers en de mogelijkheid tot precisie metingen doen wetenschappers dromen: zou het mogelijk zijn om alle wetmatigheden van de natuur na te bootsen?

Met een **digitale** tweeling kun je de natuur bijna klonen

tekst **Sebastian Grosscurt**
foto's **Koen Verheijden**

Destination Earth. Het prestigieuze vlaggenschipproject van de Europese Unie klinkt als de technologische stap vooruit die alle wereldproblematiek zal oplossen. Met het bouwen van een digitale tweeling van de aarde wil de EU alle processen nauwkeurig in kaart brengen om het totale systeem beter te begrijpen.

Een uiterst precieze, volledig geautomatiseerde kopie van de werkelijkheid brengt al snel *The Matrix* in herinnering. In de jarennegentig-sciencefictionfilm speelt het leven van de hoofdpersonages zich af in een hyperreële computersimulatie en is de werkelijkheid een illusie geworden. Destination Earth wil de echte wereld niet vervangen, maar haar juist verbeteren. Het AI-gedreven computermodel zal klimaatverandering, biodiversiteitsverlies, energietekorten en voedselschaarste oplossen. Volgens de brochure dan.

De hele aarde modelleren is nu nog een paar haltes te ver, maar de ontwikkelingen in dit onderzoeksgebied gaan in sneltreinvaart. Digitale tweelingen van fysieke objecten zijn binnen de bouwkunde en ontwerpindustrie volledig geïntegreerd. Ook voor autofabrikanten zijn kopieën van hun wagens een uitkomst. Digitale tweelingen mimeren niet alleen de huidige staat van een auto, maar ook hoe deze er na een crash aan toe is, of na 20 intensieve gebruiksjaren.

Sinds de opkomst van data-gedreven wetenschap, gestuwd door de explosieve groei in rekenkracht van computersystemen,

hebben digitale tweelingen ook in de levenswetenschappen hun intrede gemaakt. Virtuele blauwdrukken van boerderijen, vogelmigraties en het menselijk lichaam laten zien: niet alleen onbeweeglijke gebouwen en producten kunnen digitaal worden nagebootst, dit lukt ook bij dynamische organismen en nauw verweven netwerken.

“Een digitale tweeling is geen model. Modellen zijn gemiddeldes van alle mogelijke planten. Een tweeling is de kopie van één plant, die je in de echte wereld moet kunnen aanwijzen.” Aan het woord is Jochem Evers, hoogleraar gewasfysiologie. Binnen het programma voor digitale tweelingen van Wageningen University and Research hielp hij met het bouwen van een virtuele tomatenplant. “We simuleren individuele planten, voorspellen de ontwikkelingen, en synchroniseren die met metingen van de fysieke plant. De digitale tweeling groeit dynamisch mee met de echte plant.”

Steriel witte cel

Evers en zijn collega's hebben lang nagedacht over de definitie van een digitale tweeling en hoe deze zich onderscheidt van traditionele modellen. “Het woord wordt vaak onjuist toegepast. Bij een digitale tweeling gaat het om een wisselwerking tussen digitaal en fysiek. Aan de ene kant moet je modelleren en aan de andere kant moet je een plant fysiek kunnen meten.”

“Wanneer je de ontwikkeling van honderden, zo niet duizenden planten op een fijnmazige manier kunt meten, kun je uiteindelijk iets zeggen over het gewas in het algemeen”, zegt Rick van de Zedde, projectmanager bij het Wageningse Netherlands Plant Eco-phenotyping Centre (NPEC). “We meten de fysieke verschijning van de plant door foto's te maken. De hoogte, het aantal bladeren, de oppervlakte en soms ook het drooggewicht of gasuitwisseling.”

Deze gegevens worden gekoppeld aan de teeltwijze, bewatering of belichting van de

planten. Zo komen de wetenschappers erachter hoe een plant reageert op veranderingen van deze factoren. De ontdekte wetmatigheden worden in de digitale tweeling vastgelegd, waardoor ook hypothetische scenario's kunnen worden getest. Zelfs als deze scenario's niet op de fysieke plant zijn losgelaten.

Metten, dat doen plantkundigen en andere wetenschappers al jaren. Dat zou dus geen probleem moeten vormen. Bij de digitale tweeling van de tomatenplant is precies meten nog verdraaid lastig. Van de Zedde opent een luikje voor een klein raampje in een dikke isolerende deur. Daarachter een steriel witte cel waar jonge stekjes uit plastic platen opkomen, onder nauwkeurig gecontroleerde omstandigheden. Keurig gerangschikt wachten de plantjes tot de voorgeprogrammeerde camera over hen heen

De perfect gesynchroniseerde bewegingen van zoveel planten doen denken aan een deftige wals

schuift en hen fotografeert. Dag in dag uit worden de afbeeldingen automatisch geüpload. Ze zijn direct in verschillende weergaven op de tablet naast de deur te zien. Vergeleken met reguliere plantexperimenten is het minutieus meten voor een digitale tweeling van een heel andere orde.

“We hebben de faciliteiten zo gebouwd dat alle planten zo uniform mogelijk groei-

en. Elke variatie die je introduceert wil je controleren.” Van de Zedde wijst op een gelamineerd A4'tje aan de deur. Het geeft de minimale en maximale waarden (die amper een paar decimalen van elkaar verschillen) van de temperatuur, het licht, zuurstofgehalte en andere milieufactoren aan. “Dit zijn de marges waarin wij werken. Als een van de waarden niet goed is, moeten we het direct aanpassen.”

Pufje en sisjes

Ongecontroleerde variaties leiden tot meetfouten die zich in het model voortplanten, vertelt Van de Zedde. Voor een nauwkeurige digitale tweeling is een precies model nodig, gebaseerd op uiterst precieze metingen. Als de metingen er ook maar een fractie naast zitten, walst dit als een ongemerkt sneeuwbaaleffect door het model. ‘Rotzooi erin, rotzooi eruit’ heet dit in modelleersjargon.

In de kas van het NPEC is te zien hoe dit bij grotere planten in zijn werk gaat. De tomaten zijn voor een nieuw experiment vervangen door erwtenplanten en leggen dezelfde weg af als de duizenden tomatenplanten voor hen. Alles in deze kas is geautomatiseerd om menselijke fouten en meetvariatie te beperken. Iedere plant staat precies op zijn voorgeprogrammeerde plek en wordt eens per dag op een lopende band naar de fotoruimte gereden.

De perfect gesynchroniseerde bewegingen van zoveel planten doen denken aan een deftige wals. Onder begeleiding van mechanische pufje en sisjes en in een balzaal van geëgaliseerde klimaatcondities. Alle planten krijgen een exact gelijke behandeling. Bij meetverschillen is de variatie in teeltwijze nagenoeg uitgesloten. Alle verschillen tussen planten zijn te verhalen op de variatie binnen het gewas en worden dus meegenomen wanneer de onderzoekers het totaalbeeld van het gewas destilleren.

Om informatielacunes in de digitale tweeling op te vullen, wendden sommige on-





In de kas van het Wageningse Netherlands Plant Eco-phenotyping Centre worden planten gekweekt en dagelijks gefotografeerd.

derzoekers zich tot AI. Deze technieken kunnen een kracht zijn, maar kennen ook zwaktes. “Een op AI gebaseerde digitale tweeling heeft geleerd hoe hij tot het juiste resultaat moet komen, maar hoe het model dat precies doet, weten we dan niet”, vertelt Evers. “Ons doel is de mechanismes van een plant doorgronden, daarom zijn onze tweelingen gebaseerd op mechanistische modellen. We gebruiken AI wel bij het herkennen van tot nog toe onbekende parameters, om die vervolgens in het mechanistische model te verwerken.”

Het mes van de digitale plantentweelingen snijdt aan twee kanten. Tomatenkwekers juichen de ontwikkelingen toe: ze kunnen hun opbrengst zeer nauwkeurig voorspellen én de grens van het minimale energie- en waterverbruik opzoeken. “In het echt gaat een teler niet zo snel experimenteren en de ondergrens opzoeken”, zegt Willem Jan Knibbe, een van de Wageningse kartrekkers van het onderzoek naar digitale tweelingen. Als een teler per ongeluk onder het minimale belandt, zal zijn opbrengst drastisch mislukken. In de virtuele wereld maakt dit niets uit.

Veluwe

De heilige graal is volgens Knibbe dan ook dat alle toekomstige experimenten op virtuele kopieën worden uitgevoerd en fysieke planten overbodig worden. Alleen, net zoals in de verhalen over koning Arthur, is het streven naar de heilige graal een naïef verlangen. “Uiteindelijk loop je tegen de grenzen aan van het paradigma van de data-gedreven wetenschap”, bekent Knibbe openhartig. De variatie tussen individuele planten en plantensoorten, boven op de optelsom van niet te elimineren onnauwkeurigheid en het eindeloos grote aantal benodigde metingen. Het maakt het simpelweg onmogelijk om alles te meten en te modelleren. In elk model moet je de keuze maken tussen meten (en dus specificeren) en niet meten (en dus versimpelen). “Het is net als het weer. Je kunt het weer niet oneindig voorspellen, hoe precies je ook meet.”

Dat een tomatenplant volgens Knibbe eigenlijk al te complex is om te kopiëren,

Vergeleken met de al lastig te modelleren tomatenplant is een ecosysteem chaotisch en oncontroleerbaar

houdt Marcel Visser niet tegen nog groter te dromen. In zijn met hout en glas beklede kantoor, op luttele minuten lopen van de gedigitaliseerde tomatenplanten, vertelt de onderzoeker van het Nederlands Instituut voor Ecologie (NIOO-KNAW) over zijn nieuwe project: LTER-LIFE. Met 20 miljoen euro van de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek op zak wil dit project hele ecosystemen modelleren, te beginnen met de Waddenzee en de Veluwe. “De Veluwe is een heel actueel gebied. Wij willen weten hoe de natuur zich daar ontwikkelt als we bijvoorbeeld de stikstofdepositie halveren. Wat gebeurt er dan met het gehele ecosysteem?”

Vergeleken met de al lastig te modelleren tomatenplant is een ecosysteem chaotisch en oncontroleerbaar. Bij een digitale tweeling van de Veluwe kunnen de klimaatcondities niet worden afgesteld om de foutmarges te beperken, laat staan dat elke vierkante meter van de Veluwe dagelijks op de lopende band kan worden gezet. Is het virtueel klonen van een ecosysteem geen onmogelijke opgave?

“Als je naar een heel ecosysteem kijkt, dan kijk je niet naar de verschillende weefsels in de planten binnen dit ecosysteem. Je stopt veel eerder”, zo legt Visser de grofmazigheid van de beoogde digitale tweelingen uit. “Opschalen wil niet zeggen dat je veelomvatter bent, want je ondergrens gaat ook omhoog. Je verlaagt het detailniveau op het moment dat je opschaaft. Het is bijvoor-

beeld niet mogelijk om te voorspellen hoeveel paardenbloemen onder verschillende scenario's op een grasmat komen te staan, maar we kunnen misschien wel zien of er een grasveld of een bos komt, en of dat dan een naald- of een loofbos is.”

Visser vergelijkt de digitale ecosystemen graag met klimaatmodellen. Het weer van morgen en overmorgen kunnen meteorologen goed voorspellen, maar het weer over twee weken wordt al een stuk ingewikkelder. “Dat betekent niet dat het internationale klimaatpanel geen klimaatscenario's voor 2100 kan schetsen.” De digitale tomatentweeling kun je zien als precieze weer-voorspellingen, waar de ecosystemekopieën van Visser eerder grootschalige verschuivingen in het klimaat willen vatten.

Data in Excelsheetjes

“Ons doel is om ecosystemen beter te begrijpen en erachter te komen hoe deze ecosystemen reageren op bepaalde ingrepen of veranderingen.” Momenteel is deze kennis gestoeld op inzichten van experts, die met hun onderzoekservaring en veldkennis een inschatting maken over het toekomstige verloop van een gebied. Die kennis wil Visser gaan aanvullen met doorgerekende scenariostudies van digitale tweelingen. Hopelijk met nieuwe inzichten tot gevolg.

De kennis van experts en hun ecologische data is momenteel niet voor iedereen toegankelijk. De eerste essentiële stap in het creëren van de digitale tweelingen is het beschikbaar stellen van data. FAIR maken, noemt Visser dit, een acroniem van de Engelse termen voor vindbaar, beschikbaar, samenwerkend en herbruikbaar.

“Dit is een groot probleem binnen de ecologie. Er wordt heel veel data verzameld, maar er is weinig data beschikbaar. Elke organisatie heeft het in Excelsheetjes, of wat voor vorm dan ook, in hun eigen systeem staan. Sommige organisaties hebben hun data intern geeneens op orde.”

De eerste stap in het bouwen van een digitaal ecosysteem is dus de data beschikbaar stellen. Vervolgens moet alles gestandaardiseerd worden en dezelfde indeling krijgen. Als dat is gelukt, wordt alle informatie in



De plant rolt op de lopende band.

een virtuele onderzoeksomgeving gezet. Hierin kan elke onderzoeker een digitale tweeling bouwen en zelf bepalen welke factoren zijn gespecificeerd en welke zijn versimpeld, zodat het precies is afgesteld op diens vraagstuk.

Elke digitale tweeling begint met een veelomvattende exercitie in datavergaring en beheer. Waar de digitale tomatenplant tot stand kwam dankzij een uiterst precies meetsysteem, kan de virtuele Veluwe alleen bestaan bij gratie van alle informatie-bezittende onderzoeksorganisaties. En zelfs als het lukt, zullen onderzoekers alsnog tegen de grenzen van de data-gedreven wetenschap aanlopen.

De fysieke wereld blijft onmisbaar om de biologische en ecologische wetten te beschrijven. Perfecte en allesomvattende digitale tweelingen – zoals Destination Earth – zijn voor nu nog een droombestemming. Maar, zo denkt Visser, als een onderzoeker écht gelooft dat de natuur op zekere hoogte voorspelbaar is, moeten we in ieder geval naar dat einddoel streven.