

# Modellering van het vaatbundelweefsel in appel

Een Functioneel-Structureel Plant Model (FSPM) is een computermodel dat zowel de mechanistische processen als de structuur van een plant omvat. De mechanistische processen zijn alle fysische, biologische of moleculaire processen die relevant zijn voor de plant of het plantorgaan in kwestie. De structuur heeft betrekking op de juiste geometrie en topologie van het orgaan dat wordt gemodelleerd. Een FSPM streeft ernaar de complexe interacties tussen deze aspecten vast te leggen om beter inzicht te verwerven in de fysiologie van de plant. Een functioneel structureel appelfruitmodel kan worden gebruikt om fundamentele aspecten van appelgroei en -ontwikkeling te onderzoeken.

## VAATBUNDELWEEFSEL, CRUCIAAL VOOR VRUCHTGROEI

Een belangrijk weefsel van de appel is het vaatbundelnetwerk dat een complexe 3D-structuur heeft doorheen het appelvlees. Aangezien de drijvende kracht voor appelgroei celexpansie is en een dergelijke expansie het gevolg is van watertransport naar de vrucht, is het vasculaire netwerk een belangrijke structuur om correct te modelleren. Daarom is een algoritme ontwikkeld dat in een appel een vasculair netwerk creëert voor verschillende groeistadia. Het algoritme kan, voor elke fase van appelgroei, een realistisch netwerk genereren.

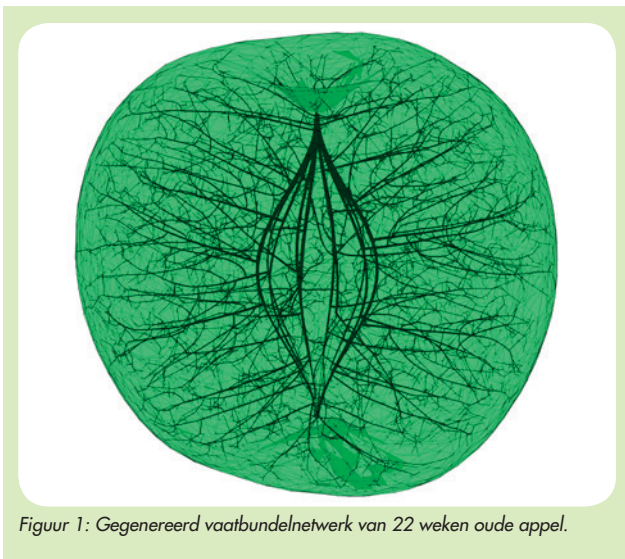
## CREATIE VAN HET VASCULAIR NETWERK VIA RUIMTE-KOLONISATIE

Ruimte-kolonisatie is een wiskundige methode om een willekeurig, niet-overlappend en vertakkend netwerk in een bepaald volume te maken. Hier is het volume de appelvorm. En we willen dat volume vullen met een netwerk dat lijkt op wat in de natuur zal worden gecreëerd. Het netwerk wordt weergegeven door een 3D-rooster dat bestaat uit knooppunten en verbindingen. Elke knoop heeft x-, y-, z-coördinaten en elke verbinding heeft een lengte tussen twee knooppunten. Het algoritme werkt door het volume van de appel eerst te vullen met een groot aantal willekeurig geplaatste aan-

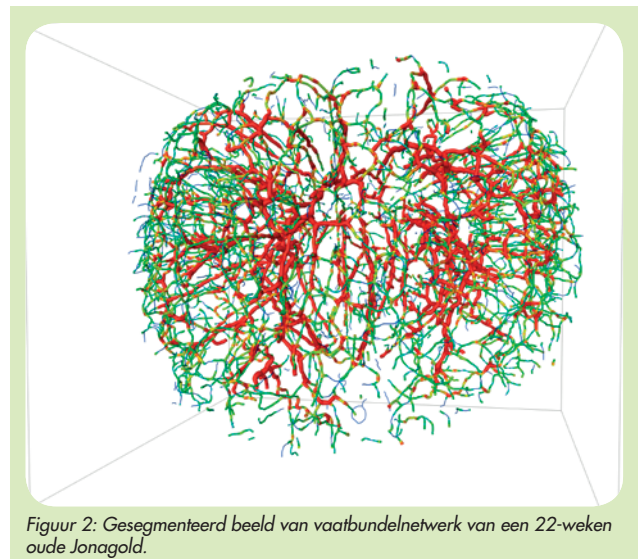
trekkingspunten, rond een initieel aantal knooppunten van het vaatbundelnetwerk, gedefinieerd op de hoofdvaatbundels van de vrucht die van de steel naar de kelk lopen. Voor elk knooppunt wordt gezocht naar de dichtstbijzijnde aantrekkingspunten, volgens bepaalde regels. Vervolgens groeit vanuit elk knooppunt, een verbinding naar het midden van de burenwolk waar een nieuw knooppunt wordt toegevoegd voor de volgende stap in het algoritme. De aantrekkingspunten trekken dus de takken van het netwerk die zich het dichtst bij hen bevinden, naar zich toe. Dit resulteert erin dat het netwerk de ruimte efficiënt vult. Als een knooppunt zich binnen een bepaalde afstand van een aantrekkingspunt bevindt, wordt dat punt verwijderd. Deze stappen worden herhaald totdat alle aantrekkingspunten zijn verwijderd en het netwerk is gegroeid om het appelvolume te vullen dat door de punten werd ingenomen. Figuur 1 toont een voorbeeld van een gegenereerd vasculair netwerk van een volgroeide appel.

## DE APPELMORFOLOGIE WORDT IN REKENING GEBRACHT

Het algoritme voor ruimte-kolonisatie kan zeer realistisch ogende natuurlijke netwerken creëren. De methode wordt ondermeer gebruikt om bomen te genereren voor computergrafische doeleinden. Naarmate knooppunten naar punten gaan waar ze het dichtst bij zijn, simuleert de methode



Figuur 1: Gegeneerd vaatbundelnetwerk van 22 weken oude appel.



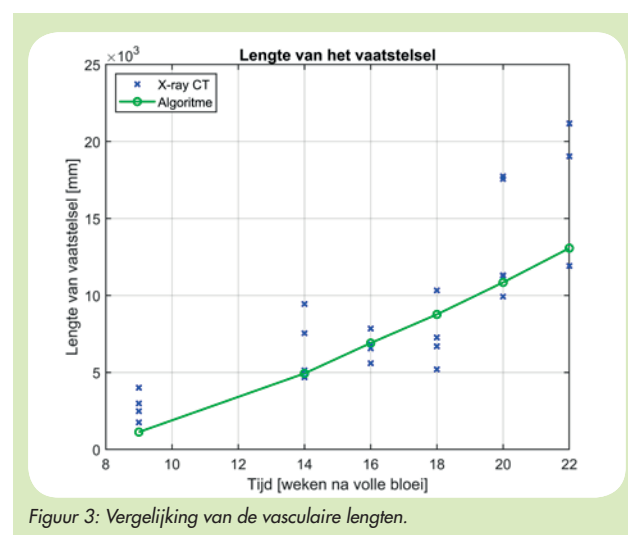
Figuur 2: Gesegmenteerd beeld van vaatbundelnetwerk van een 22-weeken oude Jonagold.

nauwkeurig de concurrentie tussen de takken van een boom om ruimte en zonlicht. Het vaatstelsel in appel is echter niet volledig willekeurig. Er zijn verschillende afzonderlijke bundels die altijd dezelfde vorm hebben. Er zijn twee vasculaire systemen met betrekking tot hun positie in de vrucht: het corticale systeem dat zich in de cortex bevindt, en het carpelsysteem, dat zich in de kern bevindt. Het corticale systeem bestaat uit 10 bundels die, als ze in de vrucht vanuit het steeltje komen, rond het klokhuis uit elkaar gaan en dan onder het klokhuis bij de kelkbladen samensmelten. De 10 bundels bestaan uit 5 kelkbladbundels en 5 bloembladbundels, afwisselend van elkaar. Vanuit deze bundels vertakt het vaatstelsel zich in het vruchtvlees en vult het de gehele cortex van de vrucht. De structuur van het carpelsysteem is hier niet gemodelleerd omdat deze zich in de kern bevindt en omdat het vasculaire netwerk dat water en voedingsstoffen levert aan het vruchtvlees voortkomt uit de 10 belangrijkste corticale bundels. Dus wordt eerst een 3D-netwerkmodel gemaakt dat de 10 belangrijkste corticale bundels voorstelt en gebruikt als het startpunt van het algoritme. Dit houdt rekening met de appel- en klokhuisvorm. Die appelvorm wordt gegenereerd door een vormmodel, dat is opgesteld op basis van 3D-X-stralendomografie beelden van vruchten in verschillende groeistadia. Dit vormmodel laat ons toe willekeurige realistische vormen van appels van verschillende cultivars te genereren. Het kolonisatie-algoritme genereert vervolgens het willekeurige vasculaire netwerk dat zich vertakt vanuit de hoofdbundels in de 3D-vorm van de appels.

### REALISTISCHE VAATBUNDELNETWERKEN OP BASIS VAN X-STRALENTOMOGRAFIE

Wil de gegenereerde structuur van het vaatnetwerk nuttig zijn, dan moet deze vergelijkbaar zijn met die van een echte appel. Het gegenereerde netwerk moet dus worden vergeleken met een netwerk verkregen uit echte appels. Om

ruimtelijke gegevens van appelvaatstelsel te verkrijgen, wordt X-stralendomografie (CT) gebruikt. Appels werden op verschillende tijdstippen tijdens de groei geplukt. Daarna werden CT-scans van de appel gemaakt om 3D-beelden te maken van de interne structuur van de vruchten. De bundels lichten op in de röntgenbeelden omdat ze bestaan uit dicht opgepakte xyleem- en floëemweefsels. Op deze manier krijg je met behulp van 3D-beeldsegmentatietechnieken de ruimtelijke gegevens van de vaatstructuur. Figuur 2 toont een voorbeeld van vasculair netwerk gesegmenteerd uit een röntgen CT-scan van een 22-weeken oude Jonagold appel. Door de grafieken statistisch met elkaar te vergelijken, kunnen de parameters van het algoritme worden gekalibreerd om netwerken te genereren met een vergelijkbare lengte en ruimtelijke verdeling als wat met de röntgenscans is gemeten. Figuur 3 toont een grafiek van de gegenereerde vasculaire lengte vergeleken met de gemeten lengte over de tijdsperiode van 9 tot 22 weken.



Figuur 3: Vergelijking van de vasculaire lengten.

Dit onderzoek werd ondersteund door het onderzoeksfonds KU Leuven

#### Structural modelling of apple vasculature

An algorithm was developed to generate the vasculature of apple. The algorithm can generate vasculature accurate in length and spatial distribution for growing apples ranging from 9 – 22 weeks after bloom. The space colonization algorithm is used to generate a random network of vasculature that branches off from the main cortical bundles and fills the entire cortex region. The main cortical bundles, which have a consistent shape, are approximated with cosine functions. The parameters in the algorithm are calibrated by comparing the length and spatial distribution of the generated vasculature against the length and spatial distribution of vasculature networks obtained from image segmentation of apple X-ray CT scans.