Hoofdstuk 1

Begrip van een zaadje

Ionica Smeets

Hoe beschrijf je de processen in een ontkiemend zaadje? Met die vraag kwam het bedrijf *Fytagoras* naar de studiegroep. Er blijkt verrassend weinig bekend over wat er allemaal precies gebeurt in een zaadje en de wiskundigen verzamelen zoveel mogelijk biologische data voor ze een model maken. Uiteindelijk lukt het hen om verschillende modellen te maken die het zuurstofgebruik van een zaadje tijdens het ontkiemen beschrijven.

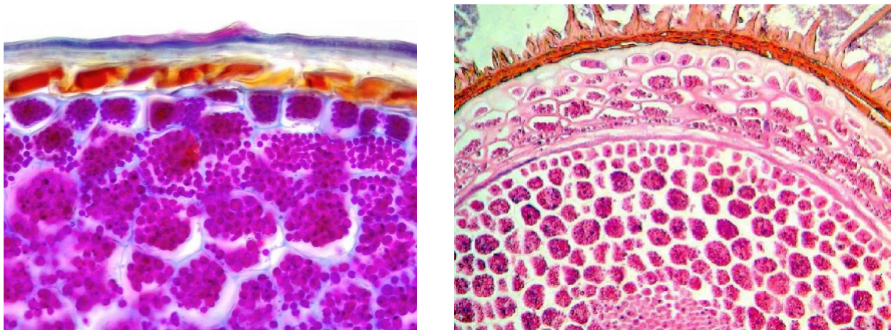
Fytagoras is een dynamisch wetenschappelijk bedrijf met veel expertise op het gebied van sensor technologie, zaden en het telen van gewassen. Het test bijvoorbeeld de kwaliteit van een partij zaad voor kwekers met hun speciaal ontwikkelde Q2-machine die het zuurstofgebruik van een zaadje tijdens het ontkiemen meet. Fytagoras presenteert aan het begin van de studiegroep meetgegevens van drie soorten zaad: gerst, suikerbiet en savooiekool.

Het is alleen lastig om deze meetdata te vertalen naar begrip van wat er binnen in het zaadje allemaal gebeurt. Er is namelijk nog weinig bekend over de verschillende processen die tijdens het ontkiemen zuurstof gebruiken. Het is een complexe combinatie van allerlei biologische processen waarover nog niet zoveel details bekend zijn.

Om een volgende stap te maken in hun analyses, wil Fytagoras graag een model dat het zuurstofgebruik van een ontkiemend zaadje beschrijft in termen van eigenschappen van het zaadje en de processen die zich daarin afspelen. Het bedrijf hoopt zo meer inzicht te krijgen in hoe bijvoorbeeld een beschermlaag rond een zaadje het kiemproces beïnvloedt. Nu krijgen alleen exclusieve zaden zo'n voorbehandeling om voor een hogere opbrengst te zorgen. Als er nieuwe, goedkopere technieken komen, kunnen die ook worden toegepast op veel voorkomende zaden als rijst. De hogere opbrengst van de zaden, zorgt dan voor meer voedsel en uiteindelijk minder hongersnood. Kortom: Fytagoras heeft hoge verwachtingen van de studiegroep.

Biologische kennis. De wiskundigen duiken eerst in de biologische literatuur om te begrijpen hoe een zaadje er precies uitziet. Linda Wiegman, student aan de Technische Universiteit Delft, belandde bij de studiegroep toen ze op zoek was naar een interessant bachelor-project bij een bedrijf dat wiskunde in de praktijk toepast. ÒIk vond het heel leuk dat er bij deze vraag zoveel biologie kwam kijken. We moesten onze kennis echt vanaf nul opbouwen om tot een goed model te komen.Ó

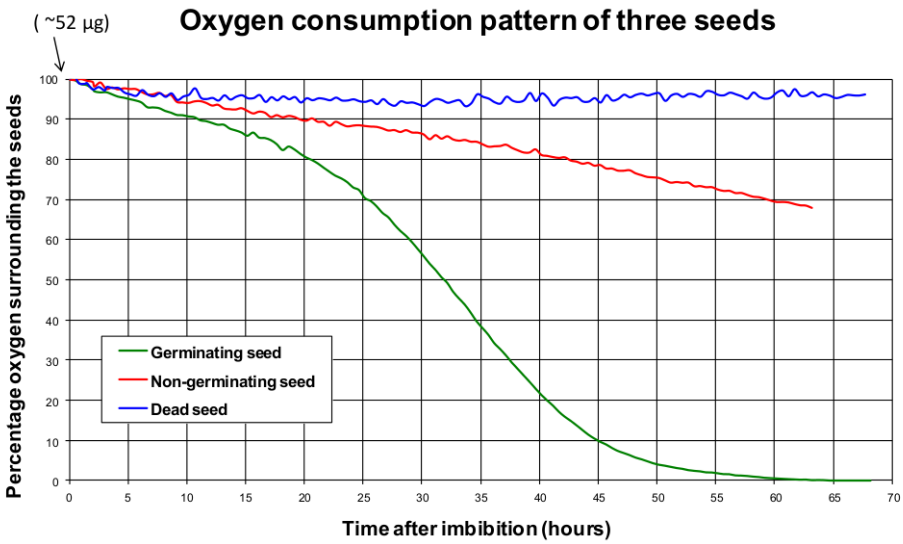
Hoe een zaadje er van binnen precies uitziet, verschil sterk van soort tot soort. Zo is gerst een eenzaadlobbige met reservevoedsel voor de embryo in het kiemwit. Suikerbiet en savooiekool zijn dan weer tweezaadlobbigen waarbij het reservevoedsel van het kiemwit is overgaan in de zaadlobben. In elk geval bevat elk zaadje een embryo dat zal uitgroeien tot een nieuwe plant. Ook is er in één of andere vorm van reservevoedsel dat het embryo kan gebruiken om te groeien. Tenslotte zit aan de buitenkant de zaadhuid die het embryo beschermt tegen schade en uitdroging.



Figuur 1.1: De zaadhuid kan er bij verschillende soorten heel anders uitzien. Links die van de papaver met een dichte zetmeellaag, rechts de kruisbes met veel meer ruimte tussen de cellen. De structuur van de zaadhuid bepaalt mede hoe snel een zaadje zuurstof op kan nemen.

Voordat een zaadje kan ontkiemen, moet het eerst water opnemen. De cellen in een zogenaamd slapend, droog zaadje bevatten nauwelijks water, terwijl een typische plantencel voor pakweg 70% uit water bestaat. Alleen cellen met voldoende water kun zich uiteindelijk delen om voor groei te zorgen. Bij de eerste fase van het ontkiemen, nemen de cellen in het zaadje dus water op en nemen hun oorspronkelijke vorm aan. Na de water-opname is er zuurstof nodig: zowel voor de interne reparaties als voor het groeien van de embryo. De eerste fase van het ontkiemen is voltooid zodra het kiemplantje door de zaadhuid breekt. Het doel van team Fytagoras is om het zuurstofgebruik in deze fase goed te modelleren.

Fytagoras meet het zuurstofgebruik van de zaadjes in hun speciale Q2-scanner. Elk zaadje zit in een klein buisje met een zuurstofgevoelige fluorescerende laag. Door een gekleurde lichtpuls in het buisje te sturen en de reflectie te meten, is op elk moment



Figuur 1.2: Drie typische grafieken van zuurstofgebruik zoals Fytogaras ze meet met hun Q2-machine. Op de verticale as staat hoeveel zuurstof er na verloop van tijd aanwezig is bij de zaadjes. De grafieken laten duidelijk het verschil zien tussen dode, slapende en kiemende zaden. Dode zaden gebruiken geen zuurstof, en slapende zaden een beetje. Kiemende zaden gebruiken eerst een kleine hoeveelheid zuurstof tijdens de water-opname en reparatie, het grote gebruik komt daarna door de celdeling bij groei.

te bepalen hoeveel zuurstof er nog in het buisje zit. De meting begint bij het water opnemen van het zaadje en stopt zodra het embryo door de zaadhuid barst.

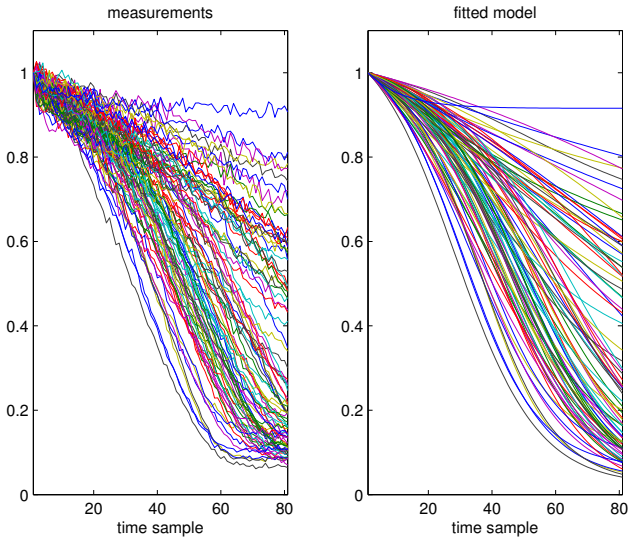
Een eenvoudig model. De aangeleverde meetgegevens van ontkiemende gerst, suikerbiet en savooiekool hebben allemaal dezelfde vorm als in de bovenstaande grafiek: eerst daalt de hoeveelheid zuurstof langzaam, dan treedt er een versnelling op en aan het eind gaat de afname weer trager.

Dat deze omgekeerde S-vorm steeds opduikt, betekent dat een algemeen biologisch proces het zuurstofgebruik bepaalt, onafhankelijk van de precieze structuur van een zaadje. Voor een eerste model nemen de wiskundigen daarom aan dat zuurstof in het zaadje voornamelijk gebruikt wordt door de mitochondriën: de energiecentrales van cellen. Ook nemen ze aan dat de zuurstof veel sneller door de celwand kan komen dan de mitochondriën haar verbruikt.

Nu modelleren ze alle mitochondriën in een cel samen als één bacteriekolonie. Daarvan weten we vrij goed hoe hij zich gedraagt: de snelheid van voortplanten is evenredig met het totale aantal bacteriën. De maximale grootte die een kolonie kan bereiken is

begrensd door de hoeveelheid zuurstof die beschikbaar is.

Met deze aannames stellen de wiskundigen een zogenaamde logistische vergelijking op voor het aantal mitochondriën dat er op een bepaald moment aanwezig is in het zaadje. Deze logistische vergelijking beschrijft overigens zeer uiteenlopende processen: bijvoorbeeld hoe populaties zich ontwikkelen, maar ook hoe tumoren groeien of hoe talen in de loop der tijd veranderen. Vervolgens kunnen de wiskundigen uit de oplossing van deze bekende vergelijking stap voor stap afleiden hoe het zuurstofgebruik eruit ziet.



Figuur 1.3: Vergelijking van het model met de werkelijkheid. Het linkerplaatje geeft het zuurstofgebruik van 91 losse gerstzaden. Het rechterplaatje geeft de resultaten van het model op basis van de logistieke functie.

De anatomie van een zaadje. Het doel van Fytagoras was echter om het zuurstofgebruik beter te begrijpen in termen van allerlei eigenschappen van het zaad. Het logistische model neemt echter helemaal geen specifieke informatie mee over de zaadstructuur. Daarom gaan de wiskundigen verder met een tweede model op basis van de anatomie van een zaadje en de processen die zich daarin afspelen.

De belangrijkste vier processen bij het ontkiemen zijn het water opnemen, zuurstofdiffusie van buiten de zaadhuid tot helemaal in de embryo, de gasstofwisseling van cellen in het zaadje en tenslotte de celdeling in de embryo. Sommige daarvan zijn veel korten dan anderen.

De fase van water opnemen kan bijvoorbeeld wel vijftien uur duren, waarbij het zuurstofgebruik min of meer constant blijft. Daarna volgt het complexere proces van zuurstofdiffusie door de zaadhuid. De zuurstof moet zich van buiten het zaad een weg banen door de zaadhuid en zo zich verspreiden door de cellen die daar binnen zitten. Helaas is er weinig bekend in de literatuur over zuurstofdiffusie bij zaden, er zijn vooral gegevens voor diffusie in vruchtvlees. De structuur van de zaadhuid zal hierbij een grote rol spelen. Daarnaast maakt het ook veel uit of er water of lucht tussen de cellen zit, zuurstofdiffusie in lucht gaat tienduizend keer sneller dan die in water. Voor de zekerheid nemen de wiskundigen in hun model de laagste snelheid, dus die in water. Hiermee schatten ze dat de diffusie door de zaadhuid ongeveer twaalf minuten kost.

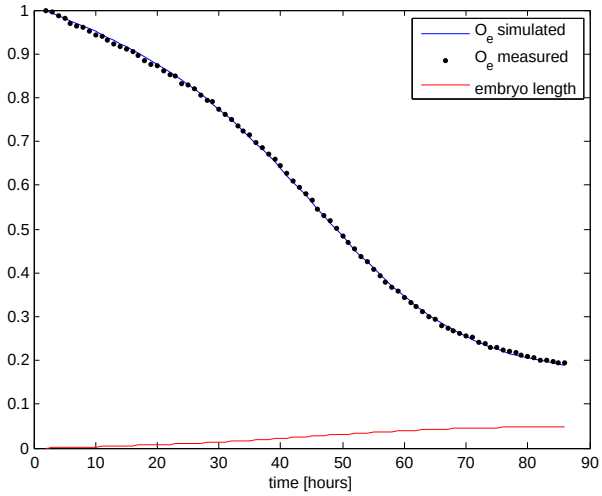
Over het derde proces, de gasstofwisseling van de cellen, blijkt ook niet bijzonder veel bekend in de literatuur. Daarom gebruikt team Fytagoras gegevens van dierlijke cellen, met de kanttekening dat hun conclusies niet zomaar te vertalen zijn naar planten. Een belangrijke les uit de literatuur is dat zuurstof zich langzaam verdeelt over de cellen. De cellen dicht bij wand zijn zuurstofrijker dan die in het midden. Om bij de middelste cellen een voldoende hoge zuurstofconcentratie te krijgen, moet er buiten het zaadje een hogere concentratie zijn dan er binnenin nodig is.

Het vierde proces tenslotte is de celdeling bij het embryo waar de nieuwe cellen ontstaan die het plantje laten groeien. Dit proces gebruikt de meeste zuurstof tijdens het ontkiemen. De tijd tussen twee delingen van dezelfde cel ligt ergens tussen de tien en vijftien uur. Door aan te nemen dat de groeisnelheid van het embryo evenredig is aan het zuurstofgebruik, kunnen de wiskundigen schatten dat het in totaal ongeveer zestig uur duurt van het begin tot het ontkiemen tot het embryo door de zaadhuid breekt.

Alles bij elkaar eindigen de wiskundigen met een model dat in drie vergelijkingen het ontkiemen van een zaadje beschrijft. Daarin zitten nog twaalf onbekenden en twee startvoorwaarden. Dat maakt het lastig om de vergelijkingen op te lossen met de beschikbare meetdata. Gelukkig is een groot deel van de onbekenden op een slimme manier te schatten. Zo blijven er slechts twee onbekenden over waarvan de waarde vervolgens gebaseerd wordt op de meetgegevens van Fytagoras. Nu kunnen ze simuleren hoe het zuurstofgebruik van een zaadje verloopt in elk fase.

Arie Draaijer van Fytagoras is verrast door de resultaten die op vrijdag gepresenteerd worden: “We dachten dat we de laagste zuurstofconcentratie die zaden nodig hebben om te ontkiemen, al wisten. Maar uit deze wiskundige berekening blijkt dat punt veel lager te liggen. Dat kan van belang zijn bij het voorbehandelen van zaden. Dat is wel een sleutelinzicht.”

Team Fytagoras: *Neil Budko, Alessandro Corbetta, Bert van Duijn, Sander Hille, Oleh Krehel, Vivi Rottschäfer, Linda Wiegman en Delyan Zhelyazov*



Figuur 1.4: Het resultaat van een simulatie van het zuurstofgebruik van savooiekoolzaad op basis van het anatomische model.