

De perfecte vorm voor alle omstandigheden

Optimale stapelingsproblemen inspireren wiskundigen al eeuwenlang. Biofysici voegen nu een extra dimensie toe aan die vraag: hoe ordenen chloroplasten zich optimaal binnen cellen, als de betekenis van “optimaal” in de loop der tijd verandert? Onderzoekers van de Universiteit van Amsterdam en Emory University in Atlanta laten zien hoe bepaalde planten dit probleem opvallend goed hebben opgelost.



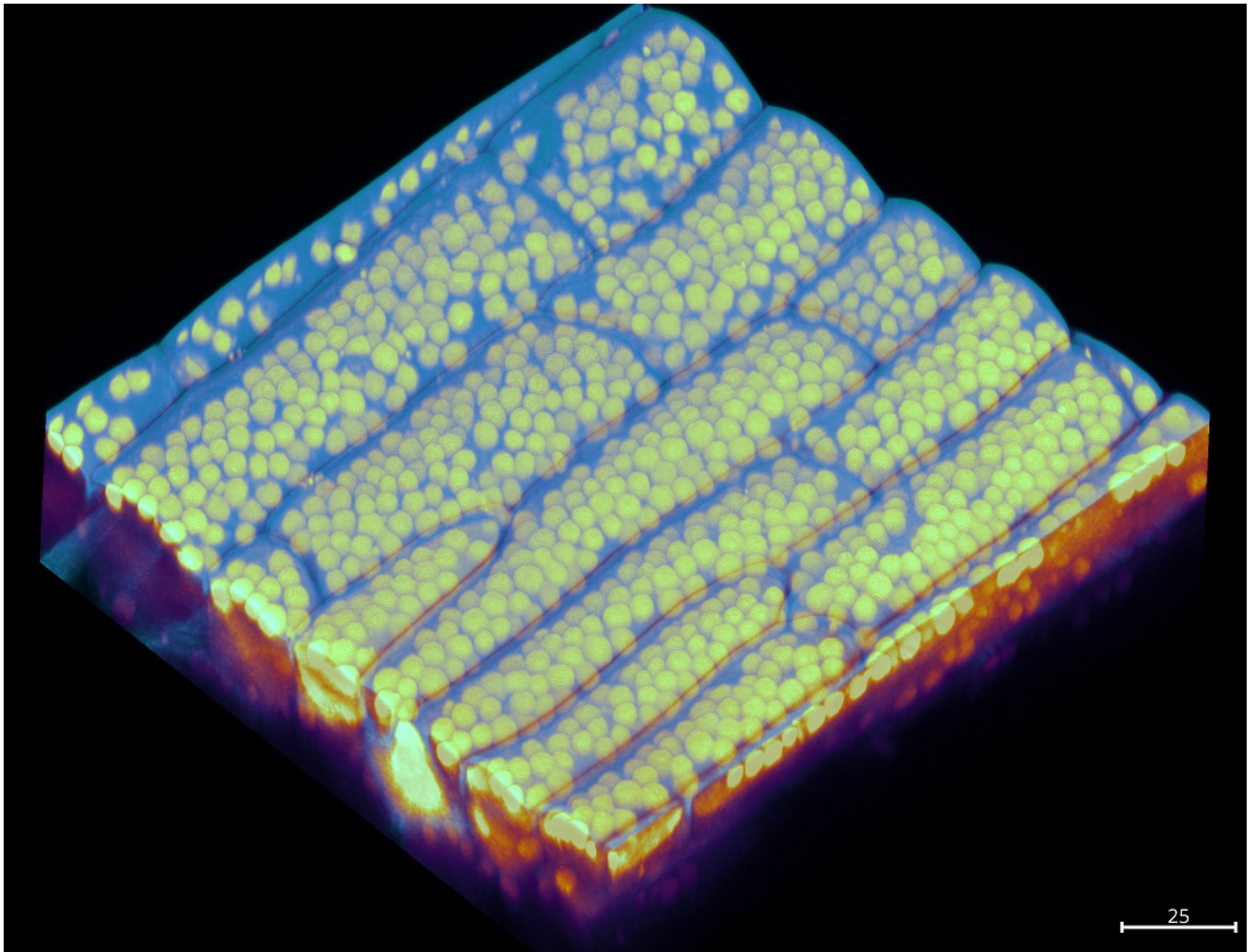
Elodea densa.Foto: Nico Schramma.

Optimale stapeling

“Hoeveel snoepjes zitten er in de pot?” De typische quizvraag klinkt eenvoudig genoeg, maar de onderliggende wiskunde is verrassend ingewikkeld. Sterker nog: hoe je objecten met een bepaalde vorm optimaal in een bepaalde ruimte kunt stapelen, is een al lang bestaand wiskundig vraagstuk. Zelfs voor iets ogenschijnlijk eenvoudigs als het stapelen van bollen duurde het bijna 400 jaar tot het bewijs van de optimale rangschikking er was – van Johannes Keplers eerste idee in 1611 tot een eerste wiskundig bewijs dat Thomas Hales in 1998 presenteerde. Wanneer je geen eenvoudige objecten als bollen wilt stapelen, maar complexere vormen, of zelfs verzamelingen van objecten van verschillende groottes, wordt de stapelingsvraag nog ingewikkelder.

Als “optimaal” verandert

Biofysicus Nico Schramma van het UvA-Institute of Physics heeft samen met Mazi Jalaal (ook IoP) en Eric Weeks van Emory University een nog complexere stapelingsopgave onderzocht – maar toch een probleem dat planten dagelijks oplossen. Het gaat om de stapeling van chloroplasten, de kleine groene organellen die zonlicht opvangen voor fotosynthese. In de cellen van de waterplant *Elodea densa* moeten schijfvormige chloroplasten zich dicht opeenpakken om zoveel mogelijk licht te absorberen. Tegelijkertijd moeten ze voldoende bewegingsvrijheid hebben om weg te kunnen bewegen wanneer de lichtintensiteit te hoog is, om schade te voorkomen.

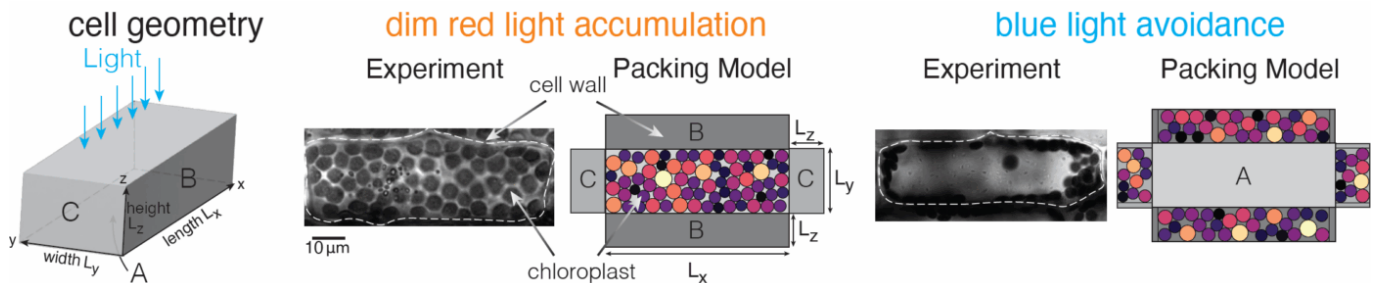


Chloroplasten in de cel. Een driedimensionaal beeld van de chloroplasten in de rechthoekige, baksteenvormige cellen van *Elodea densa*. Afbeelding: Nico Schramma et al.

Om te onderzoeken hoe deze schijfachtige objecten zich optimaal in de rechthoekige, baksteenvormige ruimtes van de cellen nestelen, combineerde het team computersimulaties met theoretische berekeningen. Ze ontdekten dat alleen bepaalde rechthoekige vormen de chloroplasten in staat stellen beide doelen te bereiken: efficiënte lichtopvang bij een hoge chloroplastdichtheid, en voldoende ruimte aan de zijkanten om alle chloroplasten te huisvesten bij het vermijden van sterk licht. Als de cel plat en vierkant is, passen de chloroplasten goed bij de lichtdoorlatende zijde, maar minder goed bij de zijkanten. Als de cel daarentegen te langgerekt is, gebeurt het tegenovergestelde. Een celvorm die beide tegengestelde doelen optimaliseert, moet zich ergens in het midden bevinden.

Links: Een baksteenachtige vorm waarin de chloroplasten een optimale stapeling moeten zien te vinden. Licht komt via de bovenkant binnen. Midden: Bij weinig licht willen de

chloroplasten zich dicht bij de bovenkant opstapelen om zoveel mogelijk licht te absorberen. De vorm is “opengevouwen” voor een gemakkelijke visualisatie. Rechts: Bij te sterk licht stapelen de chloroplasten zich dicht bij de zijwanden op om het licht te ontwijken.



Licht opvangen en ontwijken. Links: Een baksteenachtige vorm waarin de chloroplasten een optimale stapeling moeten zien te vinden. Licht komt via de bovenkant binnen. Midden: Bij weinig licht willen de chloroplasten zich dicht bij de bovenkant opstapelen om zoveel mogelijk licht te absorberen. De vorm is “opengevouwen” voor een gemakkelijke visualisatie. Rechts: Bij te sterk licht stapelen de chloroplasten zich dicht bij de zijwanden op om het licht te ontwijken. Afbeelding: Nico Schramma et al.

De oplossing van de natuur

Opvallend genoeg komt de natuurlijke vorm van Elodea-cellen heel goed overeen met de voorspelde optimale vormen. Wat het aantal chloroplasten in zo’n vorm betreft: de onderzoekers ontdekten dat de chloroplasten niet tot de absolute maximumdichtheid zijn opgestapeld, maar in plaats daarvan net genoeg ruimte laten voor langzame herschikkingen, wat resulteert in een gedrag dat vergelijkbaar is met [dat van moleculen in glasachtige substanties](#).

Samen zorgen de slimme keuzes van vorm en dichtheid – de elegante oplossing van de evolutie voor een ingewikkeld wiskundig vraagstuk – ervoor dat de Elodea densa-cellen optimaal kunnen switchen tussen een lichtverzamelende en een lichtvermijdende toestand. Toekomstig onderzoek zal uitwijzen of vergelijkbare principes ook van toepassing zijn op andere planten en hun strategieën om zich aan te passen aan veranderend licht.

Publicatie

[Optimal disk packing of chloroplasts in plant cells](#), Nico Schramma, Eric Weeks and Maziyar Jalaal. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* (2025) **122** (43) e2511696122.